

Ayman Al Khateeb

Planung und Optimierung von Fließmontagesystemen –
Ein Beitrag unter Berücksichtigung sich ändernder Anforderungen
an Prozesszuverlässigkeit, Produktqualität und Flexibilität

Planung und Optimierung von Fließmontagesystemen

Ein Beitrag unter Berücksichtigung sich
ändernder Anforderungen an
Prozesszuverlässigkeit, Produktqualität und
Flexibilität

Ayman Al Khateeb



Universitätsverlag Ilmenau
2014

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Die dieser Publikation zugrunde liegende Arbeit hat der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Ilmenau im Jahr 2014 unter dem Titel „*Beitrag zur Planung und Optimierung von Fließmontagesystemen unter Berücksichtigung sich ändernder Anforderungen, insbesondere an Prozesszuverlässigkeit, Produktqualität und Flexibilität*“ als Dissertation vorgelegen und ist online mit der URN [urn:nbn:de:gbv:ilm1-2014000104](http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2014000104) erschienen.

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

Universitätsverlag Ilmenau

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag

Herstellung und Auslieferung

Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

www.mv-verlag.de

ISBN 978-3-86360-101-0 (Druckausgabe)

URN [urn:nbn:de:gbv:ilm1-2014100082](http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2014100082)

Titelfoto: Veit Henkel | Fakultät für Maschinenbau, TU Ilmenau

Vorwort und Danksagung

Diese Dissertation entstand im Fachgebiet Fabrikbetrieb an der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Ilmenau. Als wissenschaftlicher Mitarbeiter konnte ich mich an Forschung und Lehre beteiligen. Weiterhin habe ich die Gelegenheit genutzt, viele studentische Abschlussarbeiten in der Industrie zu betreuen. Zum Gelingen dieser Arbeit hat besonders die Unterstützung der Mitglieder des Fachgebiets Fabrikbetrieb beigetragen.

An dieser Stelle möchte ich mich ausdrücklich bei meinem Doktorvater, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolf-Michael Scheid, für die Möglichkeit zur Promotion sowie für die fachliche Betreuung und Begutachtung der Dissertationsarbeit bedanken. In angenehmer und vertrauensvoller Atmosphäre hat er mich persönlich unterstützt.

Danken möchte ich weiterhin Frau Univ.-Prof. Dr.-Ing. Nina Vojdani von der Universität Rostock, Präsidentin der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik e.V. (WGTL), und Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Weißenbach, Leiter des Studiengangs Maschinenbau an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg Mosbach, für das erwiesene Interesse und die Begutachtung der Arbeit.

Ein herzliches Dankeschön geht an meine Kollegen im Fachgebiet Fabrikbetrieb Matthias Berge, Michael Brandl und Christian Wildner. Sie haben mich stets in sprachlichen Belangen beraten.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Frau Diala Karmo und unserem Sohn Elias, die mich mit viel Geduld und Verständnis für meine Arbeit stets unterstützen und motivierten.

Meinen Eltern, Schwiegereltern, Geschwistern und Freunden ist diese Arbeit in Dankbarkeit gewidmet.

Ilmenau, im Mai 2014

Ayman Al Khateeb

Zusammenfassung

In der Variantenfließfertigung können unterschiedliche Produktvarianten in einem Fließsystem in beliebiger Reihenfolge und mit unerheblichen Umrüstzeiten (Losgröße eins) hergestellt werden. Die Differenzierung von Produkten lässt sich bis zur Montage hinauszögern und dort ausgehend von einem Basiserzeugnis realisieren. Als Schnittstelle zwischen Endkunden und Fertigung sollten die Fließmontagesysteme jedoch interne (Bearbeitungszeitschwankungen, Störungen) und externe Einflussgrößen (Auftragsschwankungen, Absatzveränderungen) kompensieren. Neben der Wirtschaftlichkeit müssen Kenngrößen wie z.B. Termintreue, Flexibilität und Qualität beachtet werden. So gewinnen bei der Planung solcher Systeme Gesichtspunkte wie z.B. Redundanz, Pufferung und die Integration von Qualitätsstationen an Bedeutung. Eine Literaturrecherche verdeutlicht, dass es vor allem Defizite bei der Konfiguration von Nachbearbeitungsschleifen und in Planungsmaßnahmen zur Bewältigung von Über- und Unterkapazitäten gibt.

Entwickelt wird daher eine neue Methode zur Konfiguration von Nachbearbeitungsschleifen, mittels welcher die Taktzeit nicht basierend auf der Jahresstückzahl berechnet wird, sondern anhand der Taktzeit der mit ihnen verbundenen Fließlinien. Diese Methode lässt sich auch bei der Planung konvergierender und divergierender Strukturen verwenden.

Zur Erhöhung der Flexibilität wird unter Betrachtung der externen und internen Einflussgrößen die parallele Struktur untersucht. Anschließend wird eine Bewertung von wesentlichen Kriterien für den Vergleich von parallelen mit seriellen Strukturen durchgeführt. Aufgrund der sich ergebenden Verbesserungen der parallelen elastischen Struktur, wird eine weitere Entwicklung dieser Struktur erzielt. Im Ergebnis wird vorgeschlagen, die parallelen Stationen durch gemeinsame Puffer zu verbinden. Mithilfe dieser neuen Methode werden die Puffer besser ausgenutzt. Demzufolge erhöht sich der Gesamtnutzungsgrad bzw. Durchsatz und zugleich reduzieren sich die Puffergrößen erheblich.

Zur Entwicklung der Lösungsansätze und zur Durchführung der Untersuchungen werden in dieser Arbeit sowohl analytischer Ansatz als auch Simulation benutzt.

Schlagwörter: Fließmontagesystem, Variantenfließfertigung, Planungsmaßnahmen, Systemstruktur, Puffer, Parallelisierung, Nachbearbeitung, Flexibilität, Auftragsschwankung, analytische Methode, Simulation.

Abstract

In the Mixed-Model-Production different variants can be manufactured on the same flow system in random order and with insignificant setup times (batch size of one). The differentiation of products can be delayed until their assembling and then be executed by starting from a basic model. However, as an interface between costumers and the manufacturing, flow assembly systems should compensate internal (processing time fluctuations, machine breakdowns) and external factors (order fluctuations, changes in sales). Alongside economic effectiveness characteristics such as adherence to delivery dates, flexibility and quality are to be observed. Therefore aspects like redundancy, buffering and the integration of quality stations gain importance for the planning phase of such systems. A literature survey shows that there are mainly deficits of the configuration methods of rework-loops and of planning methods in order to cope with over- and under-capacities.

Therefore, a new method for the configuration of rework-loops is developed, in which the cycle time is not calculated based on the annual volume, but on the cycle time of the flow lines associated with them. This method can also be used in the planning of converging and diverging structures.

To increase the flexibility, the parallel structure is thoroughly investigated by considering external and internal factors. Subsequently, a review of key criteria is carried out to be used to compare the parallel structure with a serial structure. Due to the resulting improvements in the parallel elastic structure, further development of this structure is achieved. As a result, it is proposed to connect the parallel stations through common buffers. By means of the new method, the buffers are better utilized. Consequently, the overall utilization degree and throughput increase, while the buffer sizes reduce significantly.

To develop the solution statements and to carry out the investigations in this work, both the analytical approach and simulation are used.

Keywords: flow assembly system, Mixed-Model-Production, planning measures, system structure, buffer, parallelization, reworking, flexibility, order fluctuation, analytical approach, simulation.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	XII
Abbildungsverzeichnis.....	XVIII
Tabellenverzeichnis	XXIII
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung in der Produktionslogistik	2
1.2 Problemstellung von Fließmontagesystemen.....	2
1.2.1 Planungsschwerpunkte in der Konfigurationsphase	3
1.2.2 Planungsaufgaben in der Betriebsphase	6
1.2.3 Literaturlauswertung	7
1.3 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	10
2 Darstellung von Fließfertigungssystemen, insbesondere Fließmontagesystemen	14
2.1 Charakterisierung von Produktionssystemen	14
2.2 Gestaltung der Fließfertigung nach dem Objekt- bzw. Flussprinzip	16
2.3 Abgrenzung bzw. Beschreibung des Betrachtungsbereichs	18
2.3.1 Bearbeitungsstation	20
2.3.2 Puffer	22
2.4 Verkettungsart.....	23
2.5 Spezialisierungsgrad	25
2.5.1 Produktvarianten	25
2.5.2 Einprodukt- und Mehrprodukt-Fließfertigung	25
2.6 Räumliche Anordnung.....	28
2.6.1 Serielle Struktur	28
2.6.2 Konvergierende und divergierende Strukturen	28
2.6.3 Parallele Struktur	30
2.6.3.1 Parallele Arbeitsgänge bzw. Stationen	30
2.6.3.2 Gleichartige parallele Fließlinie	30
2.6.4 Fertigungssegmentierung	34
2.6.5 Bewertung von Strukturalternativen.....	35
2.7 Auftragseingang als Einflussfaktor	37
2.7.1 Markt- und Auftragsorientierte Fertigung	37
2.7.2 Auftragsschwankung	38
2.8 Ziel- und Einflussgrößen	39
2.8.1 Durchlaufzeit und Termintreue	40
2.8.2 Durchsatz	41

2.8.3	Bestände bzw. Lagerhaltungskosten	41
2.9	Zusammenfassung Kapitel 2	42
3	Gestaltung von Fließfertigungssystemen	43
3.1	Konfigurationsphase	43
3.2	Taktzeitberechnung	45
3.3	Fließbandabstimmung	47
3.3.1	Zielsetzung der Fließbandabstimmung	47
3.3.2	Einprodukt-Fließfertigung	48
3.3.2.1	Simple Assembly Line Balancing Problems (SALBP)	48
3.3.2.2	General Assembly Line Balancing Problems (GALBP)	50
3.3.2.3	Näherungsverfahren	51
3.3.3	Mehrprodukt-Fließfertigung	54
3.3.4	Zuordnungsrestriktionen	60
3.4	Dimensionierung von Puffern	60
3.5	Planung der Nacharbeit	62
3.6	Instandhaltung	63
3.7	Zusammenfassung Kapitel 3	65
4	Betrieb von Fließfertigungssystemen	66
4.1	Betriebsverhalten eines Fließfertigungssystems	66
4.1.1	Stationskenngößen	66
4.1.2	Pufferkenngößen	69
4.1.3	Systemkenngößen	71
4.1.3.1	Störverhalten	71
4.1.3.2	Bestimmung von Systemkenngößen	72
4.1.3.3	Bestimmung von Systemkenngößen in besonderen Fällen	72
4.1.4	Beispiele für Stations-, Puffer- und Systemkenngößen	73
4.2	Analyse des Systemverhaltens	74
4.2.1	Analytische Vorgehensweise	74
4.2.1.1	Warteschlangenmodelle	75
4.2.1.2	Allgemeine Approximationsformeln	80
4.2.1.3	Trichtermodell	81
4.2.1.4	Nichtlinearer Materialfluss	82
4.2.2	Simulation	84
4.2.3	Fazit	86
4.3	Konzepte der Produktionsplanung und Steuerung bei Fließsystemen	87
4.3.1	JIT-Konzept	88

4.3.2	Engpassorientiertes OPT-Verfahren.....	89
4.3.3	Reihenfolgeplanung.....	91
4.3.4	Fazit.....	91
4.4	Entwicklungsorientierte Schwerpunkte.....	91
4.4.1	Entwicklung konvergierender und divergierender Strukturen	92
4.4.2	Entwicklung paralleler Strukturen	94
4.4.3	Optimierung von Pufferkapazitäten	94
5	Entwicklung der konvergierenden und divergierenden Strukturen von Fließsystemen.....	96
5.1	Nachbearbeitungsschleifen	96
5.1.1	Untersuchungsmodell	96
5.1.2	Entwicklung eines Optimierungsverfahrens.....	98
5.1.2.1	Hydraulische Analogie	101
5.1.2.2	Optimierter nichtlinearer Materialfluss.....	104
5.1.3	Systematisierung von optimierten Gestaltungs- und Betriebsalternativen	110
5.2	Erweiterung zur Darstellung bzw. Verbesserung des Systemverhaltens.....	111
5.2.1	Der ideale Fall	113
5.2.2	Unterlast	113
5.2.3	Überlast	115
5.2.4	Fließsystem mit Engpass.....	116
5.3	Auswertung und Zusammenfassung Kapitel 5	117
6	Entwicklung der parallelen Struktur von Fließlinien	119
6.1	Vorteile der Parallelisierung aus mathematischer Sicht	119
6.2	Alternativen zur Konfiguration paralleler Strukturen	121
6.3	Simulationsuntersuchungen	123
6.3.1	Auswahl der Untersuchungsvorgehensweise	123
6.3.2	Simulationsmodelle.....	124
6.4	Ergebnisse der Simulation	128
6.4.1	Nachfrageschwankung (externe Einflussgröße)	128
6.4.2	Stets vorhandene Aufträge (interne Einflussgröße)	134
6.4.2.1	Störungswirkung	141
6.4.2.2	Manuelle Arbeit.....	154
6.4.3	Zusammenfassung und Auswertung der Ergebnisse	155
7	Optimierung von Pufferkapazitäten: Kombination von parallel gleichartigen Fließlinien.....	159
7.1	Entwicklung der Methode	159
7.2	Pufferkapazitäten bei kombinierten manuellen Fließlinien	162

7.3	Simulationsuntersuchungen von kombinierten hybriden und automatisierten Fließlinien	166
7.3.1	Simulationsmodell.....	166
7.3.2	Simulationsergebnisse.....	167
7.3.3	Weitere Vorteile der kombinierten Struktur	170
7.4	Zusammenfassung und Auswertung der Ergebnisse	170
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	173
	Literaturverzeichnis	176

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
Abs.	Abschnitt
APS	Advanced Planning System
ASM	Adaptive und selektive Montage
BG	Bandwirkungsgrad
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
CIM	Computer Integrated Manufacturing
cm	Zentimeter
d.h.	das heißt
DIN	Deutsche Industrie Norm
DLZ	Durchlaufzeit
engl.	englisch
ERP	Enterprise Resource Planning
etc.	et cetera
FIFO	First In-First Out
GALBP	General Assembly Line Balancing Problems
i.d.R.	in der Regel
JIS	Just In Sequence
JIT	Just In Time
LIFO	Last In-First Out
m	Meter
Max.	Maximierung
ME	Mengeneinheit
Min	Minute
Min.	Minimierung
Mitt.	Mittelwert
MRP	Manufacturing Resource Planning
OPT	Optimized Production Technology
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
QS	Qualitätsstation

REFA	Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V.
s	Sekunde
S.	Seite
SALBP	Simple Assembly Line Balancing Problems
sog.	sogenannte
Stck	Stück
Std	Stunde
Syn.	Synonym
Tab.	Tabelle
typ.	typisch
u.a.	unter anderem
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
VE	Verzweigungselement
vgl.	vergleiche
VW	Verschiebewagen
z.B.	zum Beispiel
ZE	Zeiteinheit
ZFE	Zusammenführungselement

Symbolverzeichnis

A	Symbol für die Verteilung der Zwischenankunftszeiten
Anz.TBF _k	Anzahl der Laufdauerabschnitte der Station k
Anz.TTR _k	Anzahl der Ausfalldauerabschnitte der Station k
A _{Tj}	Anzahl der Arbeitstage im Jahr
Aus _j	Ausgang j
b	Gesamtbedarf aller Varianten im Planungszeitraum
B	Symbol für die Verteilung der Bearbeitungszeiten
b _v	Anzahl zu produzierender Variante v im Planungszeitraum
C	Taktzeit
C _{abst}	die aus der Fließbandabstimmung resultierende Taktzeit
C _{korrr}	nach einer Einlaufphase korrigierte Taktzeit
C _{soll}	Soll-Taktzeit
C _T	theoretische Taktzeit
C _{Tg}	Taktzeit im Sinne der Grundzeit (Grundtaktzeit)

C_{Tgv}	Grundtaktzeit des v-ten Erzeugnisses in Min/Stück
D	Dirac-Verteilung
d_h	Summe der Bearbeitungszeiten aller Nachfolger von Arbeitsgang j
d_j	Bearbeitungszeit des Arbeitsgangs j
d_{jv}	Bearbeitungszeit des Arbeitsgangs j für Variante v
$E(t_a)$	Erwartungswert (Mittelwert) der Zwischenankunftszeit
$E(t_b)$	Erwartungswert (Mittelwert) der Bedienzeit
Ein_i	Eingang i
E_k	Erlangverteilung mit k Stufen
$f(VK_a, VK_b, \rho)$	Korrekturfaktor (Exponent)
F_{nom}	nominelle Arbeitszeit
F_T	verfügbare Arbeitszeit für die Taktzeit
F_{Tg}	verfügbare Zeit für die Grundtaktzeit
G, GI	allgemeine (generelle) Verteilung
G_{KLB}	Korrekturfaktor
i_s	Schichtenanzahl je Tag
K	Symbol zeigt, wieviele Warteplätze im Warteraum vorhanden sind
L	jährliche Lohnkosten pro Team der Mitarbeiter
M	Anzahl an Bearbeitungsstationen ($k=1, \dots, M$)
M	Symbol für die Exponentialverteilung in der Warteschlangentheorie
m	Anzahl paralleler und identischer Stationen im Wartesystem
M_k	mittlere Maschinenkosten pro Jahr
M_{Min}	minimale Stationsanzahl (untere Schranke)
$MTBF_k$	mittlere Laufdauer der Station k
$MTTR_k$	mittlere Ausfall- bzw. Reparaturdauer der Station k
N	Anzahl paralleler Fließlinien
n_j	Jahresstückzahl
N_j	Anzahl direkter Nachfolger von Arbeitsgang j
N_j^a	Anzahl direkter und indirekter Nachfolger von Arbeitsgang j
n_{jv}	Jahresstückzahl aller Varianten v
N_k	Nutzungsgrad der Station k
N_s	mittlere Anzahl von Erzeugnissen im Wartesystem
N_{Sy}	Gesamtnutzungsgrad
N_W	Pufferkapazität; mittlere Anzahl von Erzeugnissen im Warteraum (Puffer)
p	Anzahl der Erzeugnisvarianten (1, 2, ..v)

P_h	Prioritätswerte direkter Nachfolger
P_j	Prioritätswert des Arbeitsgangs j
P_m	Kenngröße gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass ein Erzeugnis nicht sofort bearbeitet werden kann
P_n	Bezeichnung des Puffers n
Q	Durchsatz
q_i, q_j	Mengenanteile der Erzeugnisse an Eingängen bzw. Ausgängen eines Zusammenführungs- oder Verzweigungselements
Q_{sf}	Querschnittfläche von Rohren
q_v	Anteil der Variante v an der gesamten Ausbringungsmenge
S_k	Belegung der Station k mit Arbeitsgängen
S_k	Bezeichnung der Station k
T	Dauer eines Planungszeitraums
T	die Zeitdauer der Strömung (z.B. s)
\bar{t}	mittlere Bearbeitungszeit der Arbeitsgänge
\bar{T}	mittlere Wartezeit von Erzeugnissen im Wartesystem
$t(S_k)$	mittlere Bearbeitungszeit der Station k pro ME
t_a	Zwischenankunftszeiten
t_b	Bedienzeiten
$T_{betr,k}$	Betriebsdauer der Station k
$T_{betr,Sy}$	Betriebsdauer des Systems
$TBF_{i,Eng}$	Laufdauerabschnitt i der Engpassstation
$TBF_{i,k}$	Laufdauerabschnitt i der Station k
$TBF_{i,Sy}$	Laufdauerabschnitte i aller Stationen im System
t_{er1}	Erholzeit innerhalb der Taktzeit in Min/Jahr
t_{er2}	Erholzeit außerhalb der Taktzeit in Min/Jahr
T_{FS}	Folgeausfallzeit
t_g	Grundzeit
t_{gj}	Grundzeit für Arbeitsgang j
T_k	mittlere Taktzeit der Station k
T_{kv}	Bearbeitungszeit der Station k durch Variante v pro ME
$T_{Nutz,k}$	Nutzungsdauer der Station k
$T_{Nutz,Sy}$	gesamte Nutzungsdauer des Fließsystems
T_O	organisatorische Stillstandszeit
t_r	Rüstzeit in Min/Jahr
t_s	Arbeitszeit je Schicht in Min

T_T	technische Ausfallzeit
$TTR_{i,k}$	Ausfalldauerabschnitt i der Station k
T_v	durchschnittliche Bearbeitungszeit der M Stationen durch 1 ME von Variante v
t_{v1}	Verteilzeit innerhalb der Taktzeit in Min/Jahr
t_{v2}	Verteilzeit außerhalb der Taktzeit in Min/Jahr
T_W	Instandhaltungszeit
u	mittlere Verlustzeit auf einer Station pro Erzeugnis
U	Strömungsgeschwindigkeit (z.B. cm/s)
v	Bezeichnung der Variante v
$Var, Var(t_a), Var(t_b)$	Varianz der Bearbeitungszeiten, Varianz der Ankunftszeiten, Varianz der Bedienzeiten
V_k	Verfügbarkeit der Station k
VK, VK_a, VK_b	Variationskoeffizienten, Variationskoeffizienten der Ankunftszeiten, Variationskoeffizienten der Bearbeitungszeiten
V_o	Volumen (z.B. cm ³)
V_s	Volumenstrom (z.B. cm ³ /s)
V_{Sy}	Gesamtverfügbarkeit
\bar{W}	mittlere Wartezeit im Puffer
W_n	Verzögerungsdauer (Transportdauer) im Puffer n
x	Anzahl der Arbeitsgänge
x_{jk}	Binärvariable zum Ausdrücken der Zuweisung des Arbeitsgangs j zu Station k
xxxx	Symbol für die Bedienstrategie (Bearbeitungsreihenfolge von Erzeugnissen) im Warteraum
$Z_{(1, 2, 3, 4)}$	Zielfunktion
Z_k	Zuverlässigkeit der Station k
β	Erwartungswert der Zwischenankunftszeit von Aufträgen
λ	Ankunftsrate
λ_i, λ_j	Einlaufströme bzw. Auslaufströme; Ankunftsrate durch Eingänge (i) bzw. Ausgänge (j)
μ	Bedienrate
ρ	Auslastungsgrad
ρ_s	Auslastungsgrad des Segments
σ	Standardabweichung

Verzeichnis der Indizes

Eng	Engpass
ges	gesamt
kom	kombinierte Struktur
Max	Maximum
Min	Minimum
par	parallele Struktur
Red	Reduktion
ser	serielle Struktur
soll	Soll-Kenngröße
Sy	System
zu	zusätzlich

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Übersicht von möglichen Ober- und Unterzielen von Produktionssystemen, in Anlehnung an (Zäpfel, 1982, S. 31; Hoitsch, 1993, S. 26; Domschke & Scholl, 1997, S. 97)	3
Abb. 1.2: Ausgewählter Problem-Zielkatalog in der Konfigurationsphase.....	5
Abb. 1.3: Ausgewählter Problem-Zielkatalog in der Betriebsphase	7
Abb. 1.4: Wandel des Zielsystems, in Anlehnung an (Wiendahl & Nyhuis, 1998, S. 3; Hellmich, 2003, S. 9)	10
Abb. 1.5: Überblick über die Inhalte der Arbeit.....	11
Abb. 2.1: Organisationsformen der Fertigung, vgl. (Zäpfel, 2000, S. 159; Boysen, 2005, S. 7; Günther & Tempelmeier, 2005, S. 13)	17
Abb. 2.2: Klassifizierung untersuchungsorientierter Fließmontagesysteme.....	19
Abb. 2.3: Beispiel für einen Vorranggraphen, vgl. (Zäpfel, 2000, S. 205)	21
Abb. 2.4: Pufferarten nach ihrer Einbindung in die Fließsysteme, vgl. (Janisch, 1979, S. 32)	23
Abb. 2.5: Verkettungsarten der Fließfertigung	24
Abb. 2.6: Einprodukt- und Mehrprodukt- Fließfertigung, in Anlehnung an (Scholl A. , 1999, S. 7)	26
Abb. 2.7: Beispiel für eine konvergierende Struktur der Fließmontagesysteme, vgl. (Manitz, 2004, S. 6).....	29
Abb. 2.8: Beispiel für eine Nachbearbeitungsschleife, vgl. (Helber, 1999, S. 160).....	30
Abb. 2.9: Untersuchte serielle und dementsprechende parallele Strukturen, in Anlehnung an (Daganzo & Blumenfeld, 1994)	31
Abb. 2.10: Strukturalternativen für Fließsystem bezüglich des in Abb. 2.3 dargestellten Vorranggraphen, vgl. (Zäpfel, 2000, S. 215)	33
Abb. 2.11: Ausgewählte Ziele bei der Bewertung von Strukturalternativen in Anlehnung an (Zäpfel, 2000, S. 218; Kratzsch, 2000)	36
Abb. 2.12: Klassifizierung von Absatzveränderungen, in Anlehnung an (Krüger A. , 2004, S. 19; Scholl & Deuse, 2009, S. 7)	39
Abb. 3.1: Planungsteilschritte bei der Konfiguration von Fließfertigungssystemen, in Anlehnung an (Kuhn, 1998, S. 8).....	43
Abb. 3.2: Beispiel für eine U-förmige Struktur, in Anlehnung an z.B. (Boysen, 2005, S. 69)	51

Abb. 3.3: Lösungsverfahren der Fließbandabstimmung, in Anlehnung an (Kratzsch, 2000, S. 19)	52
Abb. 3.4: Vorranggraph des Beispiels A, in Anlehnung an (Domschke & Scholl, 1997, S. 181).....	53
Abb. 3.5: Erzeugung des Mischgraphen für das Beispiel B, in Anlehnung an (Domschke & Scholl, 1997, S. 252)	56
Abb. 3.6: Belastungsdiagramm für die Zielfunktion Z_4	59
Abb. 3.7: Ermittlung optimaler Pufferkapazität, in Anlehnung an (Basu, 1977).....	61
Abb. 3.8: Charakterisierung der Instandhaltung, in Anlehnung an (DIN31051, 2012).....	63
Abb. 4.1: Darstellung der Zeitanteile von Montagestationen, in Anlehnung an (VDI3423, 2011; Lotter & Wiendahl, 2006, S. 380)	67
Abb. 4.2: Ausfalldauer- und Laufdauerabschnitte in einer betrachteten Betriebsdauer T_{Betr}	67
Abb. 4.3: Verkettungsverluste in Form von Warte- und Blockierzeit	70
Abb. 4.4: Darstellung eines Wartesystems, in Anlehnung an (Arnold & Furmans, 2005, S. 113)	76
Abb. 4.5: Dekomposition eines Fließsystems in Subsysteme, in Anlehnung an (Kuhn & Tempelmeier, 1997)	78
Abb. 4.6: Darstellung von allgemeinem Trichtermodell und Durchlaufdiagramm, in Anlehnung an z.B. (Nyhuis & Wiendahl, 1999, S. 25)	82
Abb. 4.7: Verzweigungs- und Zusammenführungselemente.....	83
Abb. 4.8: Darstellung des kritischen und unkritischen Teils eines Produktnetzwerkes, in Anlehnung an (Corsten, 2004).....	90
Abb. 5.1: Das Untersuchungsmodell der Nachbearbeitungsschleife	96
Abb. 5.2: Darstellung der Erzeugnisströme vor und nach den Verzweigungs- (VE) und Zusammenführungselementen (ZFE)	98
Abb. 5.3: Systematische Vorgehensweise zur Optimierung von Nachbearbeitungsschleifen.....	99
Abb. 5.4: Darstellung der Fließlinien als hydraulische Rohre und Vernetzungselemente als Ventile oder Pumpen	102
Abb. 5.5: Austausch von Strömen mit Bearbeitungsraten der Abb. 5.2	104
Abb. 5.6: a) Zusammenführungselement mit mehreren Eingängen (Ein) und nur einem Ausgang (Aus). b) Verzweigungselement mit mehreren Ausgängen und nur einem Eingang	106
Abb. 5.7: Erzeugnisströme bei der Montagestation	106

Abb. 5.8: Darstellung der Struktur der sich ergebenden Nachbearbeitungsschleife.....	107
Abb. 5.9: Drei verbundene Segmente in der Fließmontage	112
Abb. 5.10: Darstellung des idealen Falls, in Anlehnung an (Nyhuis & Wiendahl, 1999, S. 63)	113
Abb. 5.11: Darstellung einer Unterlast	114
Abb. 5.12: Darstellung einer Überlast	115
Abb. 5.13: Beispiel für drei verbundene Segmente mit einem Engpass	116
Abb. 6.1: Beispiele für zeitliche Verläufe von Bearbeitungszeiten zweier Stationen S_1 bzw. S_2 und der sich ergebenden kombinierten Station $S_{1,2}$	120
Abb. 6.2: Skizzierung von zwei parallelen Linien und ihrer äquivalenten fiktiven Linie	122
Abb. 6.3: Allgemeine Informationen zu den Strukturen und Kenngrößen der Simulationsmodelle.....	126
Abb. 6.4: Untersuchungsplan.....	128
Abb. 6.5: Untersuchte Verteilungen der Zwischenankunftszeiten von Aufträgen	129
Abb. 6.6: Einfluss von Nachfrageschwankungen auf die Durchsätze serieller und paralleler Strukturen.....	130
Abb. 6.7: Einfluss von Nachfrageschwankungen auf das Betriebsverhalten	131
Abb. 6.8: Einfluss von Nachfrageschwankungen auf die Ausbringungsmenge bei der Untersuchungsdauer von 82851 ZE	133
Abb. 6.9: Beispiel für das Betriebsverhalten der parallelen Struktur während eines Szenarios der Nachfrageschwankung (links), (rechts:) maximaler Durchsatz der jeweiligen parallelen Linie	134
Abb. 6.10: Stationsbearbeitungszeiten in Sekunden.....	135
Abb. 6.11: Vergleich zwischen den Durchsätzen bei seriellen und parallelen Strukturen (links). Die Tabelle (rechts) zeigt die Menge gefertigter Varianten in den Linien A und B.....	136
Abb. 6.12: Vergleich zwischen den Betriebszeitanteilen bei seriellen und parallelen Strukturen.....	136
Abb. 6.13: Vergleich zwischen den Durchsätzen und Betriebszeitanteilen der parallelen Linie.....	137
Abb. 6.14: Vergleich zwischen den Durchlaufzeiten bei individueller Fertigung von 1000 Stck jeweiliger Varianten	139

Abb. 6.15: Darstellung der gewonnenen Durchsätze bei elastischen Strukturen ($N_W = 1$ Pufferplatz)	139
Abb. 6.16: Vergleich zwischen den Betriebszeitanteilen der elastischen Strukturen ($N_W = 1$ Pufferplatz)	140
Abb. 6.17: Beispiele für die Verteilungswahrscheinlichkeiten der untersuchten Störungs- und Laufdauer	141
Abb. 6.18: Allgemeine Untersuchungsdaten des ersten Szenarios	142
Abb. 6.19: Vergleich zwischen den Betriebszeitanteilen bei starr seriellen und parallelen Strukturen unter Beachtung von Störungsentstehungen nach dem ersten Szenario	143
Abb. 6.20: Puffereinfluss auf den Durchsatz und die Gesamtverfügbarkeiten und -nutzungsgrade	144
Abb. 6.21: Vergleich zwischen den Betriebszeitanteilen unter Beachtung von Störungsentstehungen ($N_W = 18$ Pufferplätze)	145
Abb. 6.22: Wahrscheinlichkeiten der Häufigkeiten von Pufferinhalten bei zwei unterschiedlichen Engpasspositionen	146
Abb. 6.23: Einfluss von Stördauern auf die Gesamtverfügbarkeit und den -nutzungsgrad bei starrer und elastischer Verkettung	147
Abb. 6.24: Untersuchungsplan des zweiten Szenarios	148
Abb. 6.25: Puffereinfluss auf den Durchsatz und die Gesamtverfügbarkeiten und -nutzungsgrade (Fließlinien ohne Engpässe, unterschiedliche Laufdauer)	149
Abb. 6.26: Vergleich zwischen den Betriebszeitanteilen im Fall einer gleichen Stördauer (Fließlinien ohne Engpässe, $N_W = 5$ Pufferplätze, unterschiedliche Laufdauer)	150
Abb. 6.27: Puffereinfluss auf den Durchsatz, die Gesamtverfügbarkeiten und -nutzungsgrade bei gleichen Stör- und Laufdauern (Fließlinien ohne Engpässe)	151
Abb. 6.28: Vergleich zwischen den Betriebszeitanteilen im Fall einer gleichen Stör- bzw. Laufdauer (Fließlinien ohne Engpässe, $N_W = 20$ Pufferplätze)	152
Abb. 6.29: Einfluss von Stördauern auf die Kurven des Durchsatzes, des Gesamtnutzungsgrades und der Gesamtverfügbarkeit im Fall einer gleichen Laufdauer (Fließlinien ohne Engpässe, $N_W = 20$ Pufferplätze)	152
Abb. 6.30: Wahrscheinlichkeiten der Häufigkeiten von Pufferinhalten (Fließlinien ohne Engpässe)	153

Abb. 6.31: Einfluss von Pufferkapazitäten auf den Durchsatz bei manuellen Fließlinien	155
Abb. 7.1: Die neue kombinierte Struktur	160
Abb. 7.2: Beispiel zur Darstellung der Redundanz bei der kombinierten Struktur	161
Abb. 7.3: Beispiel für zwei Subsysteme serieller Struktur und das entsprechende Subsystem bei paralleler Struktur.....	163
Abb. 7.4: Mittelwert der Warteschlangenlänge N_w für das G/G/m-Modell (mit $\rho = 70, 90, 95 \%$ und $m = 1, 5, 10$) in Anlehnung an (Bolch, Greiner, de Meer, & Trivedi, 2006, S. 273)	165
Abb. 7.5: Die zu untersuchenden elastischen Strukturen	166
Abb. 7.6: Vergleich des Puffereinflusses auf die Systemkenngößen und den Durchsatz bei einer einzelnen Stationsverfügbarkeit von 80 %	167
Abb. 7.7: Vergleich des Einflusses verschiedener einzelner Stationsverfügbarkeiten auf die Systemkenngößen und den Durchsatz.....	169
Abb. 7.8: Darstellung einer Möglichkeit, eine weitere Station parallel zu beiden parallelen Stationen hinzuzufügen	170
Abb. 7.9: Grober Vergleich zwischen den seriellen, parallelen und kombinierten Strukturen.....	171
Abb. 7.10: Einfluss des Wandels des Zielsystems auf die Prozessorientierung bei Fließmontagesystemen	172

Tabellenverzeichnis

Tab. 1.1: Grobe Darstellung ausgewählter Veröffentlichungen zu Fließmontagesystemen.....	9
Tab. 2.1: Merkmale industrieller Produktionssysteme, in Anlehnung an (Corsten, 2004, S. 29).....	15
Tab. 3.1: Beispiele für Prioritätsregeln zur Fließbandabstimmung.....	53
Tab. 3.2: Eine zulässige Lösung für das Beispiel A	54
Tab. 3.3: Überblick über die Stationsbearbeitungszeiten pro Takt je Variante in ZE	57
Tab. 3.4: Überblick über die Stationsbearbeitungszeiten für die Zielfunktion Z_4 , in Anlehnung an (Domschke, Klein, & Armin, 1996).....	59
Tab. 4.1: Literaturüberblick: Beispiele für Stations-, Puffer- und Systemkenngrößen	74
Tab. 5.1: Darstellung einer zulässigen Lösung zur erneuten Abstimmung des Segments 2.....	109
Tab. 6.1: Überblick über die Stationsbearbeitungszeiten für eine parallele Fließlinie.....	125
Tab. 6.2: Bewertung von ausgewählten Kriterien bei der parallelen Struktur im Vergleich zur seriellen Struktur	158
Tab. 7.1: Wirkungen der Pufferbefüllung auf die damit verbundenen Stationen bei der konventionellen Struktur	160
Tab. 7.2: Wirkungen der Pufferbefüllung auf die damit verbundenen Stationen bei der kombinierten Struktur	161

1 Einleitung

Die Fließmontage wurde erstmals von Henry Ford in der Autoproduktion zur Herstellung des T-Modells verwendet, wobei Arbeitsteilung und Standardisierung im Vordergrund standen, vgl. (Lotter & Wiendahl, 2006, S. 1). Bei Planung und Betrieb solcher Systeme war das Primärziel, die Fertigung identischer Produkte mit hohem Durchsatz bei niedrigen Kosten zu erreichen.

Die Entwicklung des Toyota-Produktionssystems, insbesondere Kanban-Systeme und Just-IN-Time-Konzepte (JIT), und die darauf aufbauende hohe Wettbewerbsfähigkeit japanischer Unternehmen haben die westlichen Unternehmen dazu bewegt, neue Konzepte für die Planung und Steuerung von Fertigungsprozessen zu entwickeln. Es wird zunehmend versucht, die Montage vielfältiger Produkte in Fließsystemen zu realisieren, bei denen durch Zusammenwirken manueller und automatisierter Arbeitsplätze zugleich höhere Produktivität und Qualität erreicht werden sollen. Abweichend von dem Urkonzept Henry Fords bestand eine der wichtigsten Herausforderungen bei der Gestaltung der Fließfertigung darin, unterschiedliche Produkte in einem Fließsystem zu fertigen, ohne die Vorteile der Fließfertigung zu verlieren. Das führt vor allem dazu, dass eine rein mengenorientierte Produktionsstrategie nicht mehr zu verwirklichen ist. Ziel ist Fließfertigung von variantenreichen Produkten.

Die Differenzierung von Produkten erfolgt grundsätzlich im Montagebereich, indem aus bereits gefertigten Einzelteilen vielfältige Produkte höherer Komplexität hergestellt werden. Die Montage kennzeichnet sowohl die Schnittstelle zum Endkunden als auch die Endstufe der Fertigung. Auf diese Weise müssen einerseits alle Kundenwünsche bezüglich Lieferterminen, Varianten und Produktanzahlen in der Montage berücksichtigt werden. Erhöhte Anforderungen durch Kundenwünsche und starke Stückzahlschwankungen wirken sich besonders auf die Produktion und vor allem auf die Montage aus, vgl. (Fleischer, Stepping, & Plaggemeier, 2005), wobei die Produktionsprozesse fortwährend an die veränderten Rahmenbedingungen anzupassen sind. Andererseits potenzieren sich alle Fehlleistungen vorgelagerter Bereiche in der Montage. So werden Mängel in der Teilequalität häufig erst in der Montage sichtbar, vgl. (Kaußler, 2011, S. 2). Demzufolge können Störungen bzw. Fehler und Ausschuss in den Montagelinien und somit Fehlmengen und/oder Verspätungen bei Lieferungen entstehen.

Da angesichts immer kürzer werdender Durchlaufzeiten und minimierter Bestände die Auswirkungen von Störungen und fehlerhaften Produkten gravierend sein können, nehmen Zielsetzungen wie die Gestaltung fehlertoleranter Systeme, beispielsweise durch Redundanzen, Pufferung, Integration von Qualitätssicherung und Einbeziehung eventuell erforderlicher Nacharbeit in die Systeme an Bedeutung zu.

1.1 Zielsetzung in der Produktionslogistik

Die Unternehmen sind gefordert, einerseits die Kundenzufriedenheit durch kurze Lieferzeit bzw. Durchlaufzeit, hohe Liefertreue und Qualität zu steigern und andererseits die Auslastung der Fertigungsanlagen zu erhöhen und die Bestände bzw. die Kapitalbindung und Pufferkapazitäten (Lagerhaltungskosten) zu reduzieren, vgl. (Scheid, 1990; Wiendahl & Nyhuis, 1998, S. 3; Medo, 2010, S. 29).

In der betrieblichen Praxis werden zwar Termine für die Kapazitätsbelegungen und somit für die Lieferungen geplant, aber nicht immer können sie gehalten werden. Das wirkt sich unmittelbar negativ auf die Wettbewerbsposition des Unternehmens aus und kann vor allem zum Verlust bestehender Kunden führen. Vorrangig sind verspätete Lieferungen unbedingt zu vermeiden. So sollten Fertigungsanlagen so flexibel gestaltet werden, dass sie unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit Lösungen für extreme vorhersehbare und nicht vorhersehbare Situationen liefern können. Auf diese Weise wurden bei (Kletti & Schumacher, 2011, S. 3) die wesentlichen Ziele eines Unternehmens durch die Wirtschaftlichkeit, Termintreue und Flexibilität festgelegt. Flexibilität bedeutet in diesem Zusammenhang, die Fähigkeit eines Fertigungssystems auf ständig veränderte Anforderungen zu reagieren bzw. sich denselben anzupassen. Zusammenfassend lassen sich die produktionswirtschaftlichen Ober- und Unterziele im Rahmen der Konfiguration und des Betriebs von Fertigungssystemen in Abb. 1.1 darstellen.

1.2 Problemstellung von Fließmontagesystemen

Die Anordnung der Stationen nach dem Flussprinzip¹ führt dazu, dass die Transportzeiten, Durchlaufzeiten und Lagerkosten im Vergleich zu anderen Organisationsformen der Fertigung sehr gering sind.

¹ Vgl. Abs. 2.2.

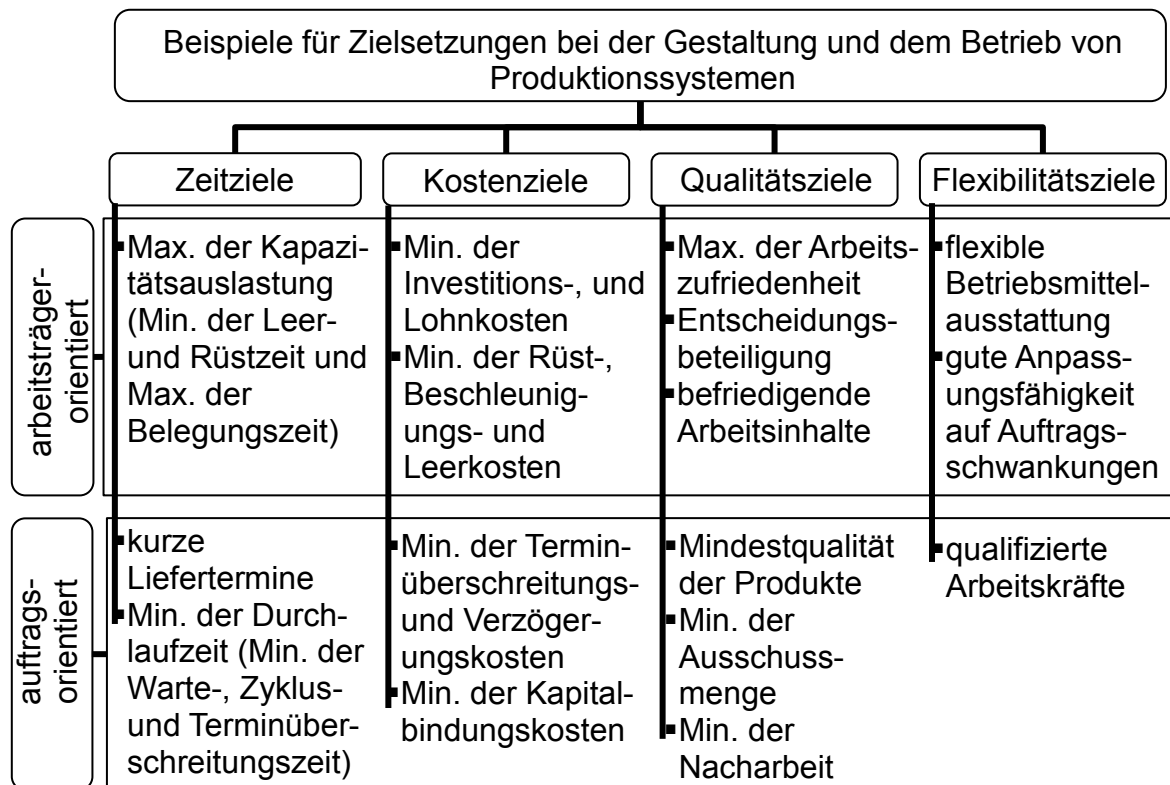


Abb. 1.1: Übersicht von möglichen Ober- und Unterzielen von Produktionssystemen, in Anlehnung an (Zäpfel, 1982, S. 31; Hoitsch, 1993, S. 26; Domschke & Scholl, 1997, S. 97)

Durch Abstimmung von Stationsleistungen und der Kürzung der Transportwege wird bei einem geeigneten Produktspektrum eine hohe Produktivität (und hoher Durchsatz) erzielt. Nach klassischer Auffassung zeichnet sich die Fließfertigung allerdings durch hohe Investitionskosten, sehr geringe Flexibilität und hohe Störanfälligkeit und damit auch hohe Instandhaltungskosten aus, vgl. z.B. (Wenzel, Georg, Metze, & Nieß, 2001, S. 158; Zelewski, Susanne, & Hügens, 2008, S. 197).

Das „klassische“ Optimierungsziel ist daher, die Effizienz verketteter Fließsysteme zu erhöhen. Bei steigender Variantenvielfalt und Auftragsschwankungen sind weitere Herausforderungen bezüglich der Zeit- und Kapazitätswirtschaft zu berücksichtigen. Es wird in der Praxis versucht, die produktionswirtschaftlichen Ziele von Fließsystemen sowohl bei der Konfigurations- als auch der Betriebsphase durch die Betrachtung eines oder mehrerer Problemfelder zu berücksichtigen.

1.2.1 Planungsschwerpunkte in der Konfigurationsphase

Die Konfiguration von Fließsystemen wirkt sich maßgeblich auf ihre Leistungen und die Investition- bzw. Betriebskosten aus. Dabei lassen sich im Wesentlichen

die Planungsprobleme in vier Felder gliedern: Fließbandabstimmung, Pufferplanung, Nachbearbeitung und Instandhaltung, vgl. (Daub, 1994; Kuhn, 1998, S. 7ff).

Im Mittelpunkt der Konfiguration der Fließfertigung steht die Fließbandabstimmung, welche wesentlichen Einfluss auf die zukünftige Leistung und Flexibilität der Fließsysteme hat, vgl. (Medo, 2010, S. 40). Aufgrund der Vereinfachung der Problemstellung können übliche Fließbandabstimmungsmodelle die reale Situation nicht vollständig darstellen. Die wesentliche Angabe für die Fließbandabstimmung ist grundsätzlich die Taktzeit, die in Anlehnung an die geplanten Jahrestückzahlen berechnet wird. Einerseits können aufgrund des Wandels zum Käufermarkt kaum noch zuverlässige Angaben zum langfristigen Absatz prognostiziert werden. Möglicherweise schwanken die Aufträge unregelmäßig während der Jahreszeiten, so dass die Arbeitssysteme rechtzeitig reagieren müssen und demzufolge unregelmäßig belastet werden, um die Liefertermine zu halten. Andererseits wird die Soll-Taktzeit nach der Fließbandabstimmung und sogar in der Betriebsphase schrittweise korrigiert, vgl. (Witt & Dürr, 2006, S. 416). In der Montage erfolgt die Taktzeitkorrektur nicht bei allen vernetzten Fließlinien in gleicher Weise, wenn Erzeugnisse mit konvergierender Erzeugnisstruktur² in Fließlinien gefertigt werden und führt deshalb zur Bildung von Engpässen und dadurch zu Leistungsverlusten.

Im Rahmen der Pufferplanung ist über die Anzahl, Anordnung und Dimensionierung von Pufferanlagen zu entscheiden. Das Ziel ist hierbei, Störungen zu isolieren bzw. ihre Wirkungen zu verringern. Störungen wirken nicht nur lokal auf die jeweilige Station, sondern auf die gesamten verketteten Stationen. Eine internationale Studie zeigt, dass sich die häufigsten Nutzungsgrade³ solcher Fließsysteme zwischen 60 % und 70 % bewegen, vgl. (Krüger T. , 2000, S. 21). Zwar lassen sich die optimalen Pufferkapazitäten, insbesondere im Rahmen der Verringerung von Störungswirkungen, mit Hilfe der Simulation berechnen, aber die Reduzierung von Pufferplätzen bzw. Lagerhaltungskosten ist immer vorteilhaft, solange geplante Durchsatzwerte und Durchlaufzeiten nicht gefährdet werden. Die Häufigkeit von Betriebsmittelausfällen bzw. Stationsstörungen und deren Stördauern lässt sich durch effektive Instandhaltungsmaßnahmen erheblich reduzieren. Allerdings sind die damit verbundenen Kosten zu berücksichtigen, wobei angestrebt wird, eine erforderliche Verfügbarkeit zu minimalen Instandhaltungs- und Ausfallfolgekosten zu erreichen vgl. (Kuhn, 1998).

² Beispielsweise beim Karosserierohrbau, vgl. (Manitz, 2004, S. 6).

³ In diesem Zusammenhang sind die Begriffe von „Auslastung“ und „Nutzungsgrad“ synonym.

Im Zuge der Nachbearbeitung sind Entscheidungen über die Anzahl, Anordnung und Größe der Qualitätsstationen, Nachbearbeitungsstationen bzw. Puffer zu treffen, vgl. (Helber, 1999). Die Hinzufügung von Qualitätsstationen und die Gestaltung von Nachbearbeitungsprozessen haben einen erheblichen Einfluss auf das Verhalten von Fließmontagesystemen, vgl. (Arnold, Isermann, Kuhn, Horst, & Furmans, 2008, S. 115). Dennoch findet man in der Fachliteratur insbesondere zu Nachbearbeitungsschleifen keinerlei Angaben über die Taktzeitbestimmung von Nachbearbeitungslinien.

Eine Übersicht über mögliche Zielsetzungen, Planungsmaßnahmen und Optimierungsmethoden in der Konfigurationsphase zeigt der in Abb. 1.2 dargestellte Problem-Zielkatalog, vgl. z.B. (Daub, 1994, S. 27; Kuhn, 1998, S. 7ff; Arnold, Isermann, Kuhn, Horst, & Furmans, 2008, S. 114ff; Linß, 2011).

		Zielsetzung	Planungsmaßnahme	Optimierungsmethode
Problemfeld	Leistungsabstimmung	<ul style="list-style-type: none"> Min. der Durchlaufzeit Max. der Kapazitätsauslastung Min. der Lohn- und Betriebsmittelkosten 	<ul style="list-style-type: none"> Fließbandabstimmung Art und Anzahl der Linien Automatisierungsgrad 	<ul style="list-style-type: none"> Fließbandabstimmungsmodelle Algorithmen Simulation
	Pufferplanung	<ul style="list-style-type: none"> Min. von Störungsfolgen Max. des Gesamtnutzungsgrades Min. von Puffergrößen 	<ul style="list-style-type: none"> Dimensionierung von Puffern Gestaltung des Transportsystems 	<ul style="list-style-type: none"> Warteschlangenmodelle Approximationsformeln Simulation
	Nachbearbeitung	<ul style="list-style-type: none"> Min. bzw. Vermeidung von Ausschuss Min. von Nachbearbeitungskosten 	<ul style="list-style-type: none"> Konfiguration von Nachbearbeitungsschleifen Dimensionierung von Puffern 	<ul style="list-style-type: none"> Algorithmen Adaptive und selektive Montage (ASM) Simulation
	Instandhaltung	<ul style="list-style-type: none"> Min. der Häufigkeit der Betriebsmittelausfälle bzw. ihrer Ausfalldauer 	<ul style="list-style-type: none"> Instandhaltungssysteme (zentralisiert bzw. dezentralisiert) Instandhaltungsbereitstellungsplanung 	<ul style="list-style-type: none"> Instandhaltungsmodelle Algorithmen Simulation

Abb. 1.2: Ausgewählter Problem-Zielkatalog in der Konfigurationsphase

1.2.2 Planungsaufgaben in der Betriebsphase

In der Betriebsphase sind operative bzw. kurzfristige Planungsprobleme zu berücksichtigen. Dabei wird die „optimale“ Nutzung der vorhandenen Kapazitäten angestrebt. Engpässe entstehen nicht nur durch mangelnde Abtaktung bzw. Synchronisierung der Fließlinien, sondern auch jeweils innerhalb der Fließlinien, und zwar durch die Wechselwirkung zwischen Varianten mit unterschiedlichen Bearbeitungszeiten. Unter Bezugnahme auf die kurzfristige Schwankung von Variantemengen entstehen hierbei schwankende Kapazitätsbedarfe, Taktzeitüberschreitungen und/oder Arbeitsüberlastungen, die sich häufig nicht vermeiden lassen, vgl. (Domschke, Klein, & Armin, 1996). Außerdem stellen die Nachfrageschwankungsmenge und Absatzänderungen ein bislang ungelöstes Problem auf operativer Ebene der Planung dar, vgl. (Krüger A. , 2004).

Weiterhin müssen die Anlagen umgerüstet⁴ werden, bevor sie mit der Herstellung anderer Varianten beginnen. In diesem Fall ist aus klassischer Sicht die Produktion von Losen sinnvoll, um die Umrüstzeiten bzw. anfallenden Rüstkosten zu reduzieren, vgl. (Domschke & Scholl, 2008, S. 115). Demzufolge entstehen mehrere Planungsentscheidungen bei der Wahl der Losgröße und der Reihenfolge von Losen. Zusätzlich dazu sind wegen der zunehmenden Kundenanforderungen, insbesondere kurzer Liefertermine bzw. hoher Termintreue, weitere dringende Entscheidungen, z.B. zur Auftragsaufnahme oder zum Liefertermin, zu treffen, vgl. (Boysen, 2005).

Die Orientierung auf die Kundenbedürfnisse hat bei Fließsystemen nach vorherrschender Meinung wegen der fehlenden Flexibilität ihre Grenze, insbesondere bei Auftragsschwankungen, so dass bei sinkender Nachfrage die Auslastung von Anlagen deutlich abnimmt während bei steigender Nachfrage sich die Termintreue verschlechtert, vgl. (Krüger A. , 2004). In seiner Dissertation hat Krüger einen Beitrag zur Planung stückzahlflexibler Montagesysteme entwickelt. Der Fokus lag auf den Anpassungsmaßnahmen an die Stückzahländerungen.

Als Übersicht über mögliche Zielsetzungen, Planungsmaßnahmen und Optimierungsmethoden wird ein Problem-Zielkatalog erstellt und in Abb. 1.3 dargestellt, vgl. z.B. (Domschke & Scholl, 1997; Kuhn, 1998; Boysen, 2005; Monkman, 2006).

⁴ Die hier später untersuchte Variantenfließfertigung wird möglich dank geradezu rasanter Fortschritte bei der Reduzierung von Rüstzeiten. Aus Tagen werden Stunden bis Minuten. Reduzierungen bis um 95 % sind realisiert worden, vgl. (Shingo, 1985, S. 113).

		Zielsetzung	Planungs- maßnahme	Optimierungs- methode
Problemfeld	Produktions- programm, Reihenfolge	<ul style="list-style-type: none"> ▪ kurze Liefertermine ▪ Verwirklichung des JIT-Prinzips ▪ Max. der Kapazitätsauslastung ▪ Min. von Lagerkosten 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Entscheidungen über Auftragsannahme ▪ Lieferterminvereinbarung ▪ Fertigungsterminplanung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Programmplanungsmodelle ▪ Algorithmen ▪ Simulation
	Losgrößen, Reihenfolge	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Min. der Taktzeitüberschreitungen ▪ Min. der Umrüstungszeit bzw. Rüstkosten ▪ Min. von Lagerkosten 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reihenfolgeplanung ▪ Losgrößenplanung ▪ Definition von Produktfamilien 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Losgrößenmodelle ▪ Algorithmen ▪ Simulation
	Instandhaltungsablaufplanung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Min. der Häufigkeit der Betriebsmittelausfälle bzw. ihrer Ausfalldauer 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Instandhaltungsablaufplanung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Instandhaltungsmodelle ▪ Algorithmen ▪ Simulation
	Planung stückzahlflexible Montage	<ul style="list-style-type: none"> ▪ kontinuierliche Planung der Fließfertigung ▪ Bewältigung von Über- und Unterkapazitäten 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Entwicklung von Methoden und Werkzeugen zur Erhöhung der Anpassungsfähigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Simulation ▪ neue Planungskonzepte

Abb. 1.3: Ausgewählter Problem-Zielkatalog in der Betriebsphase

1.2.3 Literaturauswertung

Wie oben dargestellt wird, erfolgt die Konfiguration und Planung von Fließmontagesystemen durch die Zerlegung der gesamten Planungsprobleme in kleine Teilprobleme, die durch unterschiedliche Planungsmaßnahmen bzw. systematische Planungsschritte lösbar sind. Zwar führt diese Systematik zur Vereinfachung der Planung von Subsystemen, aber sie beeinflusst das Gesamtsystem wenig. Die ständige Optimierung dieser Systeme wurde grundsätzlich jedoch durch die Behandlung von bestimmten Planungsmaßnahmen, meist mit dem Ziel der Verbesserung einer oder mehrerer ihrer Kenngrößen durchgeführt. Um einen Überblick über die Planungsprobleme von Fließmontagesystemen zu geben, wird im Fol-

genden das Ergebnis einer Literaturrecherche⁵ unter Betrachtung eines die aktuellen Fragestellungen spiegelnden Zielkatalogs durchgeführt, vgl. Tab. 1.1.

In diesem Zielkatalog werden die in Abb. 1.2 und Abb. 1.3 dargestellten Problemfelder berücksichtigt und weiterhin die Optimierungsziele in drei Oberzielen zusammengefasst:

- Hoher Durchsatz wird durch die Erhöhung der Auslastung, meist bei der Fertigung identischer Produkte, erzielt.
- Hohe Termintreue wird traditionell durch u.a. Reduzierung der Durchlaufzeit bei der Fertigung variantenreicher Produkte erreicht.
- Geringe Lagerhaltungskosten werden durch die Berücksichtigung von Puffergrößen erzielt.

Die Ergebnisse zeigt Tab. 1.1, wobei die Literaturquellen nach dem Erscheinungsjahr geordnet werden. Wichtig ist dabei zu betrachten, welche Zielsetzung in welchem Problemfeld bzw. Erscheinungsjahr mit welcher Methode erreicht wurde.

Daraus lassen sich die folgenden Aussagen grob ableiten:

- Bislang hat sich niemand mit allen zu betrachtenden Problemfeldern zugleich auseinander gesetzt.
- Trotz der enormen Entwicklung von Simulationssoftware wird bei der Planung die analytische Methode bevorzugt.
- Die Termintreue gewinnt in neueren Veröffentlichungen an Bedeutung.
- Zum Zwecke der Reduzierung von Störungswirkungen findet die Dimensionierung von Puffern und Instandhaltungssystemen auch in den neueren Veröffentlichungen wenig Beachtung.
- Nachbearbeitungssysteme finden bislang wenig Beachtung.
- Behandlung von Nachfrageschwankungen nimmt in neueren Veröffentlichungen an Bedeutung zu.

Die wachsenden Kundenbedürfnisse haben die Unternehmen gezwungen, ihre Strategien und Zielsetzungen im Bereich der Fertigung zu ändern. Die Verschiebung des Zielsystems von Betriebszielen zu Marktzielen wird anschaulich in Abb. 1.4 dargestellt.

⁵ Die Publikationen wurden so zusammengestellt, dass sie unterschiedliche Problemfelder, Zielsetzungen und den Zeitpunkt der jeweiligen Veröffentlichung aufweisen.

Tab. 1.1: Grobe Darstellung ausgewählter Veröffentlichungen zu Fließmontagesystemen

Zielsetzung	Planungsphase	Problemfelder	Autoren		
			Methode	A	
			(Hoffmann, 1963)	A	
			(Warnecke & Görke, 1978)	A	
			(Janisch, 1979)	A	
			(Daub, 1994)	A	
			(Kuhn, 1998)	A	
			(Helber, 1999)	A	
			(Krüger T., 2000)	S	
			(Krüger A., 2004)	A	
			(Boysen, 2005)	A	
			(Monkman, 2006)	A	
			(Medo, 2010)	S	
hoher Durchsatz	Konfigurationsphase	Leistungsabstimmung	●	●	
		Pufferplanung	○	○	
		Nachbearbeitung	○	○	
		Instandhaltung	○	○	
	Betriebsphase	Produktionsprogramm, Reihenfolge	○	●	
		Losgröße, Reihenfolge	○	○	
		Instandhaltung	○	○	
geringe Lagerhaltungskosten	Konfigurationsphase	Pufferplanung	○	○	
		Nachbearbeitung	○	○	
		Instandhaltung	○	○	
	Betriebsphase	Produktionsprogramm, Reihenfolge	○	○	
		Losgröße, Reihenfolge	○	○	
		Instandhaltung	○	○	
	hohe Termintreue	Konfigurationsphase	Leistungsabstimmung	●	●
Pufferplanung			○	○	
Nachbearbeitung			○	○	
Instandhaltung			○	○	
Betriebsphase		Produktionsprogramm, Reihenfolge	○	●	
		Losgröße, Reihenfolge	○	○	
		Instandhaltung	○	○	
		Stückzahlflexible Montage	○	○	

Legende:

●

Trifft zu

●

Trifft eher zu

●

Teilweise

●

Trifft eher nicht zu

○

Trifft nicht zu

A: analytische Methode, S: Simulation

Legende: ● Trifft zu ● Trifft eher zu ● Teilweise ● Trifft eher nicht zu ○ Trifft nicht zu
A: analytische Methode, S: Simulation

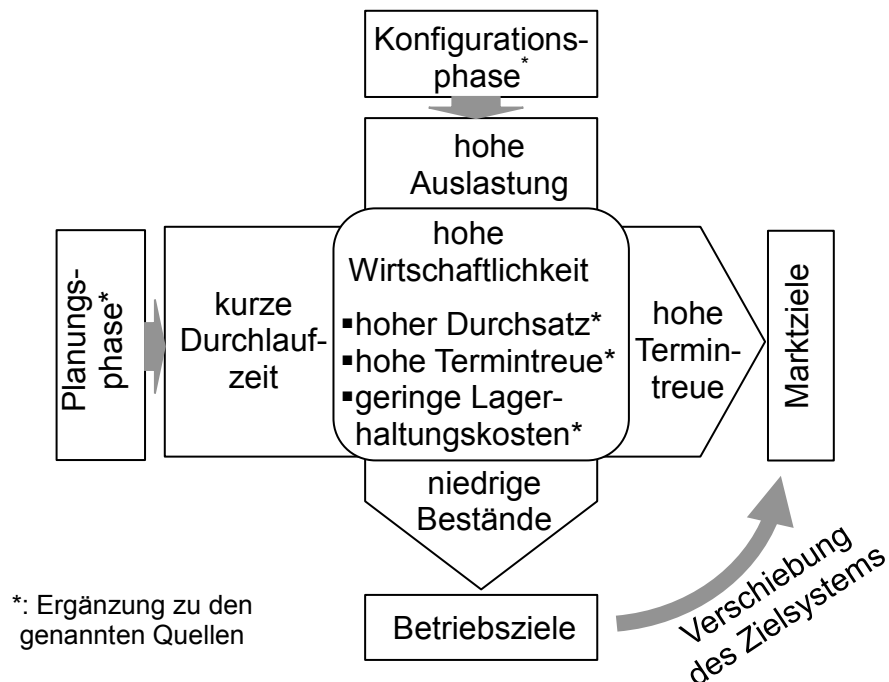


Abb. 1.4: Wandel des Zielsystems, in Anlehnung an
(Wiendahl & Nyhuis, 1998, S. 3; Hellmich, 2003, S. 9)

1.3 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Die Arbeit befasst sich generell mit der Planung und Optimierung von Fließmontagesystemen ausgehend vom zu erarbeitenden Zielkatalog. Es war zu prüfen, welche Literatur es bezogen auf Fließmontagesysteme für Stückgüter gibt und welche „Lücken“ sich in der wissenschaftlichen Bearbeitung aus dem Vergleich der Literatur mit dem Zielkatalog ergeben. Zugleich setzt die Arbeit sich mit der Frage auseinander, wie weit analytische Methoden anwendbar sind und wo sich der Einsatz von Simulation als sinnvoll bzw. notwendig erweist.

Ziel dieser Arbeit ist es, neue Vorgehensweisen bzw. Lösungsansätze zur Verbesserung der Eigenschaften bzw. Leistung von Fließmontagesystemen und vor allem zur Erhöhung der Flexibilität zu entwickeln. Im Mittelpunkt dieser Ansätze stehen einerseits die Verbesserung der Konfiguration von Nachbearbeitungsschleifen, und andererseits die Untersuchung und die Entwicklung der Struktur von parallelen Fließlinien sowie auch die Verbesserung der Ausnutzung von Pufferanlagen. Diese Themenschwerpunkte betreffen in erster Linie die Variantenfließfertigung. Es wird außerdem bei der Behandlung dieser Themen jeweils versucht, die Interdependenz zu anderen Problemfeldern zu berücksichtigen, so dass anschließend Folgerungen für das Gesamtsystem gezogen werden können. In jedem Fall

sind die neuen vorgeschlagenen Lösungsansätze zu untersuchen und durch einen Vergleich mit der Ist-Situation zu bewerten. Im Fazit sagt die Arbeit, in wieweit die Ziele durch die ausgewählten Planungsmaßnahmen als erreichbar bzw. berücksichtigt angesehen werden dürfen.

Zunächst wird in Kapitel 2 die Fließmontage als ein Teil des Produktionssystems dargestellt. Anschließend erfolgt eine Klassifizierung der Fließmontagesysteme nach der Verkettungsart, dem Spezialisierungsgrad und der räumlichen Anordnung. Dazu werden unter der Kategorie „Spezialisierungsgrad“ der Begriff „Produktvariante“ definiert und die Fertigungssysteme dargestellt. Weiterhin kommen die internen (stochastische Prozesse) und externen (Absatzveränderungen und Nachfrageschwankungen) Einflussgrößen in Betracht. Abgeschlossen wird das Kapitel mit der Erläuterung des Zielkatalogs. Die wesentlichen Inhalte der Arbeit fasst Abb. 1.5 zusammen.

Kapitel 1	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einleitung, Planungsaufgaben, Zielkatalog ▪ Zielsetzung
Kapitel 2	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Darstellung von Fließmontagesystemen und Strukturen ▪ Spezialisierungsgrad, Nachfrageschwankung ▪ Erläuterung des Zielkatalogs
Kapitel 3	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Darstellung von Planungsaufgaben, Methoden und Lösungsansätze in der Konfigurationsphase ▪ Fließbandabstimmungsprobleme und -verfahren
Kapitel 4	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Darstellung von Planungs- bzw. Steuerungsaufgaben, Methoden und Lösungsansätze in der Betriebsphase ▪ Bestimmung und Erweiterung der Schwerpunkte
Kapitel 5	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Methode zur Konfiguration von Nachbearbeitungsschleifen ▪ Erweiterung der gewonnen Aussagen zur Anwendung bei der Definition und Entlastung von Engpässen
Kapitel 6	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vorschläge zur Parallelisierung von Fließlinien ▪ Untersuchungen von gleichartigen Fließlinien unter Berücksichtigung von internen und externen Einflussgrößen
Kapitel 7	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Methode zur Entwicklung der parallelen Struktur ▪ Untersuchungen der seriellen, parallelen und kombinierten Strukturen
Kapitel 8	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zusammenfassung der Arbeit bzw. allgemeine Beurteilung der entwickelten Methoden und Lösungsansätze

Abb. 1.5: Überblick über die Inhalte der Arbeit

In Kapitel 3 werden die Planungsschritte bzw. -aufgaben in der Konfigurationsphase beschrieben. In diesem Zusammenhang werden die bereits vorhandenen Konzepte und Lösungsansätze diskutiert und beurteilt. Im Mittelpunkt dieses Kapitels steht die Darstellung von Fließbandabstimmungsverfahren. Anhand von praxisnahen Modellen (Beispiele A und B) werden sowohl die Schritte als auch die Problemstellungen der Fließbandabstimmung erläutert, wobei auch die optimalen Lösungen für die dargestellten Modelle bestimmt werden. Das im Beispiel B dargestellte Modell wird in den Kapiteln 5, 6 und 7 weiterentwickelt und mithilfe der Simulation untersucht.

In Kapitel 4 werden analog zu Kapitel 3 die Planungs- bzw. Steuerungsaufgaben, Konzepte und Lösungsansätze in der Betriebsphase dargestellt und diskutiert. Weiterhin werden die wesentlichen analytischen Modelle zur Beschreibung des Systemverhaltens zusammengestellt und bewertet. Dazu kommt die Simulation als Werkzeug zur Untersuchung und Beschreibung der Eigenschaften und Kenngrößen der Fließsysteme in Betracht. Aufbauend auf gewonnene Erkenntnisse aus den Kapiteln 2, 3 und 4 werden die untersuchungsorientierten Schwerpunkte dieser Arbeit definiert und deutlicher herausgearbeitet.

Kapitel 5 bearbeitet die Analyse bzw. Entwicklung der Struktur von Nachbearbeitungsschleifen. Zunächst wird das Systemverhalten, insbesondere die Entstehung von Engpässen und Leistungsverlusten, umfassend dargestellt. Anschließend wird eine neue Vorgehensweise zur Bestimmung der optimalen Taktzeiten von Fließlinien entwickelt, die Schleifen bilden. Dazu wird verdeutlicht, wie Engpässe in Schleifen oder in einem allgemeinen Produktnetzwerk definiert und behandelt werden, d.h., auch die Entlastung des Engpasses oder die Minimierung seiner Wirkungen.

Aufgrund der hohen Flexibilität der Struktur von parallelen Fließlinien beschäftigt sich Kapitel 6 mit der Analyse und der Untersuchung dieser Struktur. Vorschläge zur Konfigurationsalternativen werden vorerst entwickelt und diskutiert. Das Modell im Beispiel B wird wiederum behandelt und eine entsprechende parallele Struktur wird entwickelt. Mit Unterstützung der Simulation werden die logistischen Kenngrößen der parallelen Struktur im Vergleich zur seriellen Struktur ermittelt und analysiert. Weiterhin werden unter Berücksichtigung des Automatisierungsgrades von Arbeitsgängen unterschiedliche interne und/oder externe Einflussgrößen untersucht. Anschließend erfolgt eine Beurteilung der untersuchten Strukturen.

Aufbauend auf die in Kapitel 6 gewonnenen Aussagen konzentriert sich Kapitel 7 auf die Entwicklung einer neuen Vorgehensweise zur weiteren Verbesserung der parallelen Struktur. Es wird dabei erläutert, dass die Kombination von gleichartigen Fließlinien durch Puffer positive Wirkungen auf die Flexibilität hat, wobei sich die Ausnutzung der Puffer und die Redundanz erhöhen. Mithilfe der analytischen Methode und der Simulation werden vor allem die Zusammenhänge zwischen Pufferkapazitäten, Stördauern und Auslastung bzw. Durchsatz untersucht. Anschließend wird ein Vergleich zwischen den Kenngrößen der seriellen, parallelen und kombinierten Struktur durchgeführt und die gewonnenen Ergebnisse werden analysiert. Mit einer Zusammenfassung zum Inhalt der Arbeit und einer Beurteilung der gewonnenen Erkenntnisse in Kapitel 8 schließt die Arbeit ab.

2 Darstellung von Fließfertigungssystemen, insbesondere Fließmontagesystemen

2.1 Charakterisierung von Produktionssystemen

Das Produktionssystem kennzeichnet sich als wichtiges Subsystem in den Stückgüter produzierenden Unternehmen. Generell lässt sich das Produktionssystem in weitere Subsysteme Fertigungssystem (Teilefertigungs-, Montagesystem) und Logistiksystem (Lager-, Transportsystem) aufteilen, die besondere Systemstrukturen sowie auch ihre Beziehungen zueinander aufweisen. Während in der Teilefertigung Halbzeuge (z.B. Bleche, Textilflächen) oder Halbfabrikate (z.B. Gussteile) gefertigt werden, die als Einzelteile bezeichnet werden, werden in der Montage diese Einzelteile zu einer funktionsfähigen Einheit zusammengesetzt.

Um die Strukturierung unterschiedlicher realer Produktionssysteme zu erfassen, ist es notwendig, diese Systeme unter Zuhilfenahme von einem oder mehreren relevanten Merkmalen zu ordnen. Aufgrund der Vielzahl dieser Merkmale wird im Verlauf der vorliegenden Arbeit auf einige näher eingegangen, die das Verständnis der Aufgabestellung dieser Arbeit erleichtern. Die Tab. 2.1 stellt einige Merkmale zur Typisierung industrieller Produktionssysteme dar. Ein umfassender Überblick über die unterschiedlichen Merkmale bieten die folgenden Fachbücher (Zäpfel, 1982, S. 16; Kern, 1992; Hoitsch, 1993, S. 12; Corsten, 2004, S. 29) an.

Je nach Wiederholungsanzahl der unmittelbar ununterbrochenen Herstellung einer Produktvariante unterscheidet man zwischen Einzel-, Serien- und Massenfertigung. Während bei Einzelfertigung (Herstellung von individuellen Produkten z.B. Schiffe) die Anzahl der ununterbrochen hergestellten Produkte eins ist, geht es bei Massenfertigung um eine ständige dauerhafte Herstellung gleichartiger oder ähnlicher Produkte (z.B. Fahrzeuge). Als Mischform zwischen Einzel- und Massenfertigung charakterisiert sich die Serienfertigung, wobei nacheinander eine begrenzte Anzahl gleichartiger Produkte hergestellt wird. Je nach der Produktanzahl lässt sich die Serienfertigung in Klein-, Mittel- und Großserienfertigung einteilen.

Tab. 2.1: Merkmale industrieller Produktionssysteme, in Anlehnung an (Corsten, 2004, S. 29)

Merkmale		Ausprägung ⁶		
erzeugnisorientierte Typisierung	Absatzstruktur	auftrags- oder nachfrageorientierte Produktion (Bestellproduktion, Kundenproduktion)		Lagerproduktion (Angebotsproduktion, marktorientierte Produktion)
	Produktgestalt und Aufbau	Schüttgüter, Flüssigkeiten, Gase		Stückgüter
	Zusammensetzung der Stückgüter	einteilige Produkte		mehrteilige Produkte
	Spezifizierungsgrad	individuelle Produkte		standardisierte Produkte
erzeugungsorientierte Typisierung	Anordnung der Produktiveinheiten	Verrichtungsprinzip (Funktionsprinzip)	Gruppenprinzip	Objekt- bzw. Flussprinzip (Prozessfolgeprinzip, Fließprinzip)
	Abstimmung des Materialflusses	kontinuierliche Fertigung		diskontinuierliche Fertigung
	Wiederholungsgrad, Struktur der Auflagengröße	Einzelfertigung	Mehrfachfertigung	
			Massenfertigung	Serienfertigung
	Anzahl der zu durchlaufenden Produktiveinheiten	einstufige Fertigung		mehrstufige Fertigung
	Verknüpfung der Prozessfolge	lockere Verknüpfung	starre zeitliche Verknüpfung	
		(Straßen-, Reihenfertigung); keine Zeittakte	organisatorisch bedingt (Fließfertigung)	technisch bedingt bzw. verfahrensbedingt (Zwangslauffertigung)
	Spezifizierungsgrad bei der Fließfertigung	Einprodukt-Fließfertigung	serienweise Mehrprodukt-Fließfertigung	Variantenfließfertigung

⁶ Die in Klammern eingefügten Begriffe bzw. Synonyme haben keine einheitlichen Kennzeichnungen, jedoch stellen sie in den Fachbüchern ähnliche Bedeutungen dar. Außerdem wurden die Begriffe (Produktion) und (Fertigung) manchmal als Synonym verwendet, vgl. (Boysen, 2005, S. 7f).

2.2 Gestaltung der Fließfertigung nach dem Objekt- bzw. Flussprinzip

Die Anordnungen der Produktiveinheiten im Fertigungssystem lassen sich nach folgenden Prinzipien unterscheiden, vgl. (Zäpfel, 2000, S. 158; Wannenwetsch, 2010, S. 367):

- Verrichtungsprinzip
- Objekt⁷- bzw. Flussprinzip
- Gruppenprinzip

Nach dem Verrichtungsprinzip werden die Produktiveinheiten mit gleichartigen oder ähnlichen Teilaufgaben bzw. Betriebsmitteln räumlich in Fertigungsbereichen zusammengefasst. Diese lassen sich meist als Werkstätten benennen. Eine Organisation der Fertigungsprozesse nach dem Verrichtungsprinzip wird als Werkstattfertigung bezeichnet. Bei dem Objekt- bzw. Flussprinzip sind Produktiveinheiten entsprechend der Reihenfolge des Arbeitsablaufes angeordnet. Auf der Grundlage der zeitlichen Koordination der Produktiveinheiten kann die Organisation nach dem Flussprinzip zur Fertigung ohne oder mit Zeitzwang führen. Eine zeitliche Kopplung der Fertigungsprozesse kann aus organisatorischen oder technischen sowie verfahrensbedingten Gründen entstehen. Technisch oder verfahrensbedingte Zwangslaufertigung ist üblicherweise in der Chemie- oder Prozessindustrie anzutreffen, vgl. (Kießwetter, 1999, S. 15f; Boysen, 2005, S. 7). Organisationsbedingte Fließfertigung liegt vor, wenn Erzeugnisse in einem kontinuierlichen Fluss gemäß der Anordnungsreihenfolge von Produktiveinheit zu Produktiveinheit weitergegeben werden (z.B. Fließmontage in der Automobilindustrie). Eine flexible Form der Fließfertigung entsteht, wenn Puffer zwischen den Stationen in einer Fertigungslinie eingerichtet werden. Das Flussprinzip war ursprünglich i.d.R. in der Großserien- und Massenfertigung anzutreffen, wo der Produktaufbau kurzfristig nicht zu ändern ist.

Bei der Reihenfertigung werden die Erzeugnisse nach Beendigung der Bearbeitung in einen Puffer verschoben oder zu einer anderen Produktiveinheit weitergegeben. Das bedeutet, dass die erforderlichen Produktiveinheiten zwar nach dem Flussprinzip angeordnet werden, aber die Bearbeitung von Erzeugnissen an den

⁷ Ein Unterschied zwischen Objektprinzip und Flussprinzip wird bei (Spur & Stöferle, 1994; Ciupek, 2006) so definiert, dass das Objektprinzip das Flussprinzip und das Zellenprinzip beinhaltet. Dabei wird mit Zellenprinzip eine räumliche Zusammenfassung mehrerer sich ergänzender und ersetzender Produktiveinheiten bezeichnet, vgl. (Spur & Stöferle, 1994, S. 114). Das Zellenprinzip wird bei (Zäpfel, 2000; Wannenwetsch, 2010) unter Gruppenprinzip wie auch hier gegliedert.

einzelnen Produktiveinheiten zeitlich entkoppelt ausgeführt werden kann. Diese Darstellung des Materialflusses ist nur möglich, wenn das teilweise bearbeitete Erzeugnis die nächste Produktiveinheit überspringen, zurückfließen oder in einem Puffer gelagert werden kann. Dabei dienen die Puffer dazu, die Wartezeiten auf die Bearbeitung von Erzeugnissen zu vermindern bzw. zu vermeiden. Als Mischform zwischen Fluss- und Verrichtungsprinzip lässt sich das Gruppenprinzip charakterisieren. Typische Organisationsform der Gruppenfertigung ist die Fertigungsinsel. Fertigungsinseln ermöglichen die vollständige Bearbeitung unterschiedlicher Erzeugnisse mit ähnlichen Merkmalen vom Rohteil zum Fertigteil, vgl. (Wannenwetsch, 2010, S. 369). Ein Überblick über die unterschiedlichen Organisationsformen der Fertigung wird in Abb. 2.1 dargestellt.

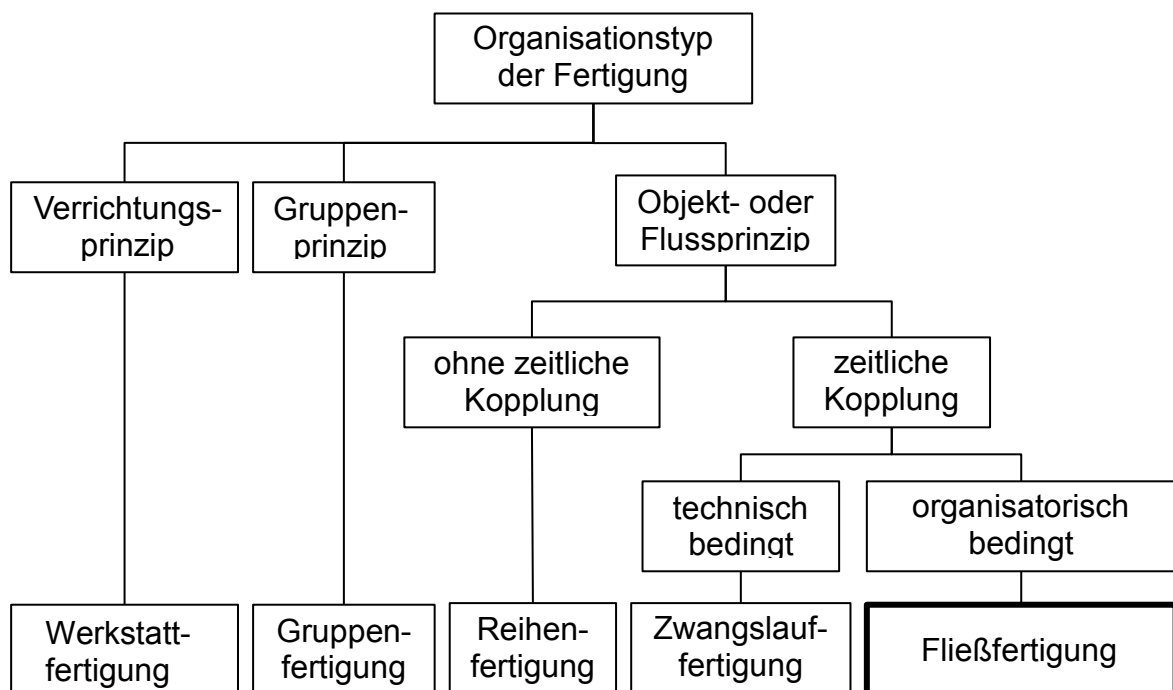


Abb. 2.1: Organisationsformen der Fertigung, vgl. (Zäpfel, 2000, S. 159; Boysen, 2005, S. 7; Günther & Tempelmeier, 2005, S. 13)

Im Vergleich zur Werkstattfertigung weist die Fließfertigung viele Vorteile auf, vgl. (Gutenberg, 1983; Adam, 1997, S. 19; Boysen, 2005, S. 19), wie z.B.:

- Hohe Fertigungsgeschwindigkeiten und dadurch Durchsätze lassen sich wegen der Arbeitsteilung und Spezialisierung erreichen. Außerdem können dabei gering qualifizierte Mitarbeiter beschäftigt werden.
- Auf der Grundlage der kurzen Transportzeiten und kleinen Zwischenlager (Puffer) ergeben sich niedrige Kapitalbindungskosten und ein geringer Flächenbedarf.

- Die Anordnungen der Produktionsprozesse nach dem Flussprinzip ermöglichen eine höhere Übersichtlichkeit und einen geringeren Verwaltungs-, sowie Steuerungsaufwand.

Dagegen lassen sich die folgenden Nachteile zusammenfassen:

- Höhere Betriebsmittelkosten (Maschinen)
- Höhere Instandhaltungskosten und niedrige Flexibilität insbesondere bei Entstehung von Störungen
- Geringe Bearbeitungszeiten und hohe Standardisierung wirken sich negativ auf die Motivation, Leistung und Zufriedenheit der Mitarbeiter aus.

2.3 Abgrenzung bzw. Beschreibung des Betrachtungsbereichs

Die vorliegende Arbeit orientiert sich auf die Untersuchung bzw. Entwicklung von Fließmontagesystemen, in denen die Arbeitsabläufe nach dem Flussprinzip organisiert werden. Ausgehend von ihrer Position an der letzten Stelle in der Wertschöpfungskette lässt sich in der Montage der *„Zusammenbau von Teilen und/oder Gruppen zu Erzeugnissen oder zu Gruppen höherer Erzeugnisebene in der Fertigung“* erfüllen, vgl. (VDI2815, 1978). Dementsprechend stellen die in der Teilefertigung eigenerstellten oder fremdbezogenen Einzelteile oder Gruppen die Hauptinputgrößen der Montage, während die fertig montierten Baugruppen oder Produkte die wichtigsten Outputgrößen der Montage sind.

Zur Beschreibung des Untersuchungsbereiches von Fließmontagesystemen (als Synonyme gelten dabei Fließfertigungssysteme oder nur Fließsysteme) werden sie im Verlauf der vorliegenden Arbeit nach der Verkettungsart, räumlichen Anordnung und dem Spezialisierungsgrad dargestellt, vgl. Abb. 2.2.

Die Hauptkomponenten eines Fließsystems stellen die Produktiveinheiten und Puffer dar, wobei in dieser Arbeit die Produktiveinheiten als Bearbeitungsstationen (Montagestation oder nur als Stationen) bezeichnet werden. Aus der Verbindung zweier oder mehrerer Stationen in serieller Form mit dem Ziel der Erfüllung einer Montageaufgabe ergibt sich ein seriell-fließsystem (Auch nur Fließsystem, Fließlinie oder Linie genannt). Die daraus entstehende Struktur lässt sich dabei als eindimensionale oder serielle Struktur bezeichnen. Ist eine Fließlinie oder eine ihrer Komponenten mit anderen Stationen oder Fließlinien parallel, in konvergie-

render oder in divergierender Form geschaltet, so wird die Struktur des entstehenden Fließsystems⁸ als mehrdimensionale Struktur bezeichnet.

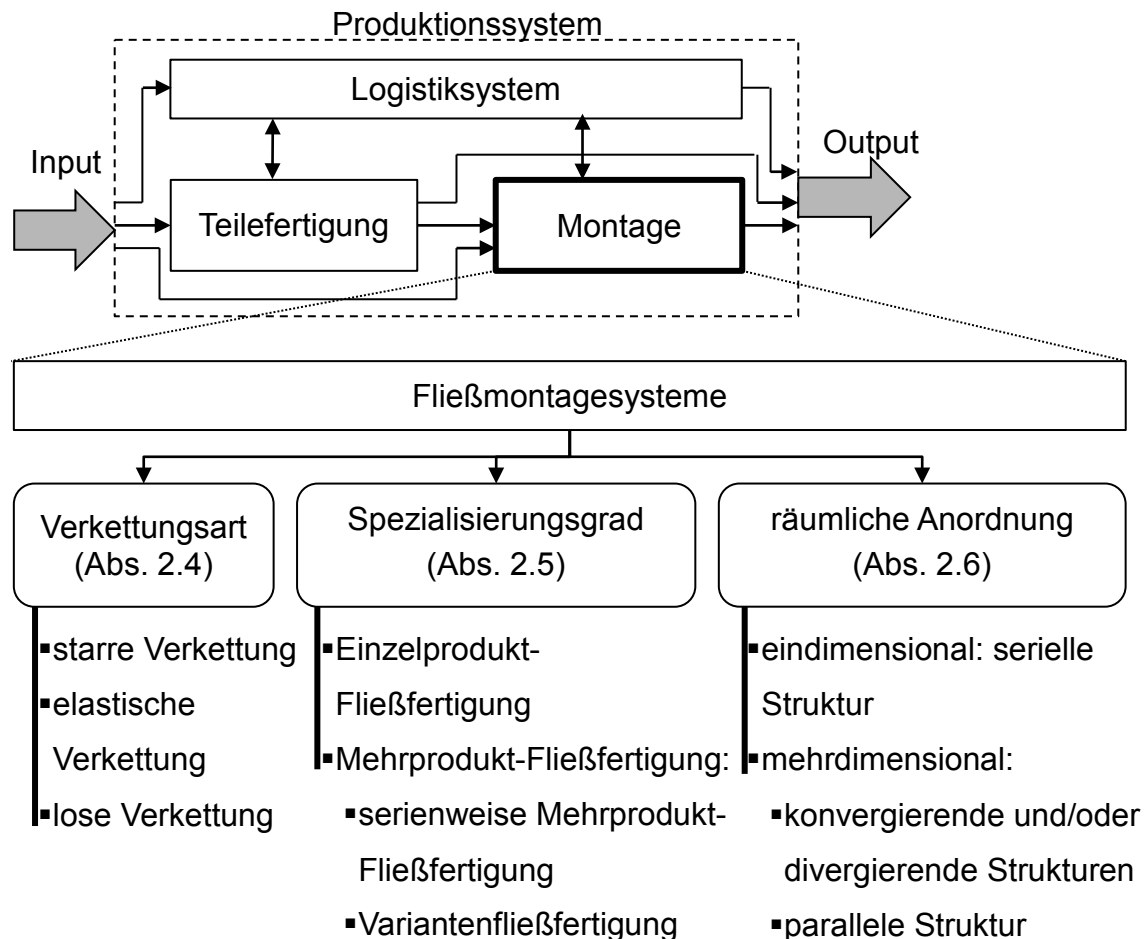


Abb. 2.2: Klassifizierung untersuchungsorientierter Fließmontagesysteme

Sind die Stationen durch Puffer verbunden, so haben die Puffergrößen einen signifikanten Einfluss auf die Fließsystemleistung. In diesem Zusammenhang lassen sich die Strukturen der Fließsysteme in starre, elastische und lose Verkettung einteilen. In Abhängigkeit von den Aufgaben von Betriebsmitteln bzw. Stationen, ob sie nur individuelle oder verschiedene Variante bearbeiten können, kann die Fließfertigung nach dem Spezialisierungsgrad in Einprodukt- und Mehrprodukt-Fließfertigung unterscheiden werden, die sich wiederum nach den erforderlichen Umrüstvorgängen in serienweisen Mehrprodukt-Fließfertigung und Variantenfließfertigung einteilen lässt.

⁸ Dabei sollte u.a. verstanden werden, dass im Gegensatz zum Begriff „Fließlinie“ der Begriff „Fließsystem“ zur Bezeichnung eindimensionaler oder mehrdimensionaler Strukturen verwendet werden kann.

Weitere Restriktionen sind im Folgenden zu erläutern:

- Die Erzeugnisse bezeichnen alle Einzelteile oder Gruppen, die sich aus zwei oder mehr Teilen und/oder Gruppen niedriger Ordnung zusammensetzen.
- Die Erzeugnisse werden immer in Reihenfolge der Stationen bearbeitet, d.h. Rückflüsse von Stationen sind nicht möglich. Eine Ausnahme stellen jedoch die Nachbearbeitungsschleifen dar (vgl. Abs. 2.6.2). Weiterhin ist das Überspringen von Stationen bei der Mehrprodukt-Fließfertigung zulässig.
- Die Stationen können durch Förderer verbunden werden, die zugleich als Puffer dienen können (vgl. Abs. 2.3.2).
- Die Mitarbeiter und Maschinen dürfen die Erzeugnisse nicht begleiten, wie z.B. bei One-Piece-Flow-Fertigung.
- Im Allgemeinen werden Fließsysteme untersucht, in denen beim Variantenwechsel keine oder fast keine Umrüstvorgänge auftreten.

2.3.1 Bearbeitungsstation

Bei der Fließfertigung lässt sich der Fertigungsprozess in eine Kette von einzelnen Stationen aufteilen, die entsprechend dem Ablauf der durchzuführenden Bearbeitungsvorgänge zur Herstellung eines Produkts hintereinander angeordnet werden. Es wird davon ausgegangen, dass die Arbeitsinhalte des Fertigungsprozesses in mehrere Arbeitsgänge oder sog. Arbeitselemente zerlegt werden können. Diese bezeichnen sich als einzelne Elementartätigkeiten bzw. als kleinste Einheiten des Fertigungsprozesses, die aus ökonomischen oder technischen Gründen nicht weiter geteilt werden können, vgl. (Klenke, 1977, S. 11). Als Beispiele für die Arbeitsgänge sind Fügen, Lötvorgänge, Schrauben oder Prüftätigkeiten zu nennen. Aufgrund der Technik lassen sich zwischen Arbeitsgängen zeitliche Reihenfolgebeziehungen ermitteln, die durch einen vorgangsknotenorientierten Netzplan oder sog. Vorranggraph dargestellt werden können, vgl. Abb. 2.3. Weiterhin zeigt der Vorranggraph die Bearbeitungszeiten der einzelnen Arbeitsgänge. In diesem Beispiel werden die Nummern der Arbeitsgänge innerhalb der Kreise dargestellt, während ihre Bearbeitungszeiten oben links außerhalb der Kreise gezeigt sind. Die Vorrangbeziehungen zwischen den Arbeitsgängen werden durch die Pfeile abgebildet.

Je nach der gewünschten Ausbringungsmenge in einem bestimmten Zeitraum werden die Arbeitsgänge entsprechend der Reihenfolgebeziehungen den Stationen so zugeordnet, dass eine fließende Arbeit entsteht. Die Summe der Bearbei-

tungszeiten der Arbeitsgänge auf einer Station ergibt die Bearbeitungszeit dieser Station.

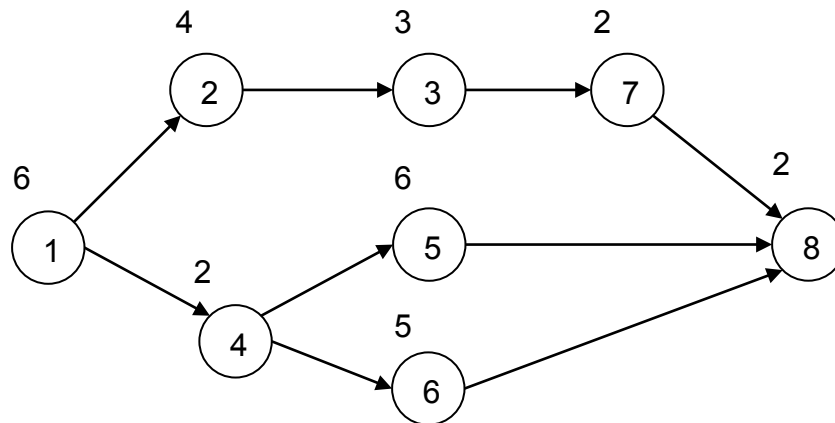


Abb. 2.3: Beispiel für einen Vorranggraphen, vgl. (Zäpfel, 2000, S. 205)

Es ist darauf zu achten, dass in vielen Fällen die Weitergabe des Erzeugnisses an die folgende Station nicht direkt nach dem Ende der Bearbeitungszeit erfolgt, sondern wenn es die Station nach Ablauf der Taktzeit der Fließlinie verlässt (vgl. starre Verkettung im Abs. 2.4), wobei die Taktzeit der höchsten Bearbeitungszeit der Stationen in der Fließlinie gleicht. Als Taktzeit wird die zur Verfügung stehende Zeit bezeichnet, um eines oder ähnliche Erzeugnisse in der Fließlinie herzustellen. Das bedeutet, in jedem Fertigungstakt wird ein fertiges Produkt aus der Fließlinie ausgeschleust.

Je nach dem Automatisierungsgrad wird zwischen automatisierten, teilautomatisierten (hybriden) oder manuellen Arbeitsgängen bzw. Stationen unterschieden. Bei automatisierten Stationen treten statisch oder dynamisch deterministische Bearbeitungszeiten auf. Während die statisch-deterministischen Modelle konstante Bearbeitungszeiten der Stationen darstellen, beschreiben die dynamisch-deterministischen Modelle zeitlich veränderliche deterministische Bearbeitungszeiten, vgl. (Domschke & Scholl, 1997, S. 185).

Zufällig entstehende Maschinenausfälle bzw. -störungen werden bei stochastischen Modellen berücksichtigt, wobei man die Bearbeitungszeiten als zufallsabhängige Größen bezeichnet. Stochastische Prozesse entstehen aber auch bei manuellen Arbeiten, die als Schwankungen der Arbeitsgeschwindigkeit zum Ausdruck kommen. Die Schwankungen hängen sowohl von der Motivation, Fähigkeit, Befindlichkeit etc. der Mitarbeiter und der Arbeitsatmosphäre als auch von der An-

derung der zu erfüllenden Aufgaben der Stationen bei der Herstellung unterschiedlicher Varianten ab, vgl. (Buzacott & Shanthikumar, 1993).

2.3.2 Puffer

Puffer sind im Prinzip Speicheranlagen. In Produktionssystemen dienen sie zum Ausgleich von Zeit- und Mengendifferenzen, die zwischen Produktionsstufen entstehen. Eine allgemeine Definition solcher Puffer findet sich in (Beins, 1997, S. 17), und zwar *„Puffer sind technische Einrichtungen zwischen Teilen der Produktion, die in der Lage sind, Arbeitsgegenstände von einem produzierenden Teil in dessen Ausstoßrhythmus aufzunehmen und im Verarbeitungsrhythmus eines nachfolgenden Teils wieder abzugeben.“*

Puffer befinden sich einerseits zwischen Stationen, um negative Wirkungen stochastischer Prozesse zu vermeiden. Typische Puffer sind Förderstrecken, die zusätzlich zu Transportaufgaben auch als Zwischenspeicher fungieren, wobei die einzelnen Stationen durch Transporteinrichtungen, z.B. eine Rollenbahn, miteinander verbunden sind. Bei manuellen Arbeiten dienen die Puffer zum Ausgleich schwankender Ausführungszeiten (Ausgleichpuffer), während sie in automatisierten Linien zur Minderung von Störungswirkungen von großer Bedeutung sind (Störungspuffer). Generell nimmt der Puffer die Erzeugnisse auf, bis die nachfolgende Station (wieder) frei ist. Andererseits werden Puffer zwischen Teilefertigung und Montage, Vor- und Endmontage oder zwischen Fließlinien vorgesehen. Diese Puffer sind wichtig zum Ausgleich von Stillständen, die bei Losgrößenänderungen oder Vorgabezeitunterschieden zwischen Vor- und Endmontage entstehen (Montagesystempuffer⁹), vgl. (Kratzsch, 2000, S. 50ff; Kropik, 2009, S. 50). Bezüglich ihrer Funktionen sowohl als Speicher von Erzeugnissen als auch als Entkoppler von Stationsstörungen, erhöhen die Puffer die Flexibilität von Fließsystemen, verursachen jedoch zusätzliche Investitionskosten. Um das Problem eventueller begrenzter Pufferkapazitäten zu vermeiden, können Rücklaufpuffer (siehe unten) oder Ausweichpuffer vorgesehen werden, in die sich die Erzeugnisse umleiten lassen, vgl. (Furmans, 1992).

Je nach Entnahmereihenfolge der Werkstücke und der Einbindung von Puffern in die Fließsysteme lassen sich verschiedene Arten von Puffern in der Praxis unterscheiden. Bei einem FIFO-Puffer (First In-First Out) verlassen die Erzeugnisse

⁹ Je nach dem Verwendungszweck lassen sich diese Puffer weiterhin als Ausgleichpuffer zwischen den Fließsystemen bezeichnen.

den Puffer in der gleichen Reihenfolge, in der sie im Puffer angekommen sind. Dabei wird von Durchlaufpuffern gesprochen. Ein LIFO-Puffer (Last In-First Out) lässt zu, dass die zuletzt in den Puffer geschobenen Werkstücke als erste den Puffer verlassen. Diese Puffer werden auch Rücklaufpuffer genannt. Sind die Puffer Mitglieder einer Schleife, so können die Erzeugnisse die Puffer vielfach durchlaufen. Deshalb werden sie Umlaufpuffer genannt. Wenn die Erzeugnisse nicht im Fördersystem gespeichert werden, sondern in separaten Speicheranlagen, werden diese als Direktzugriffpuffer bezeichnet. In diesen Puffern können viele unterschiedliche Erzeugnisse gespeichert werden, vgl. (Janisch, 1979). Die Pufferarten werden in Abb. 2.4 angezeigt.

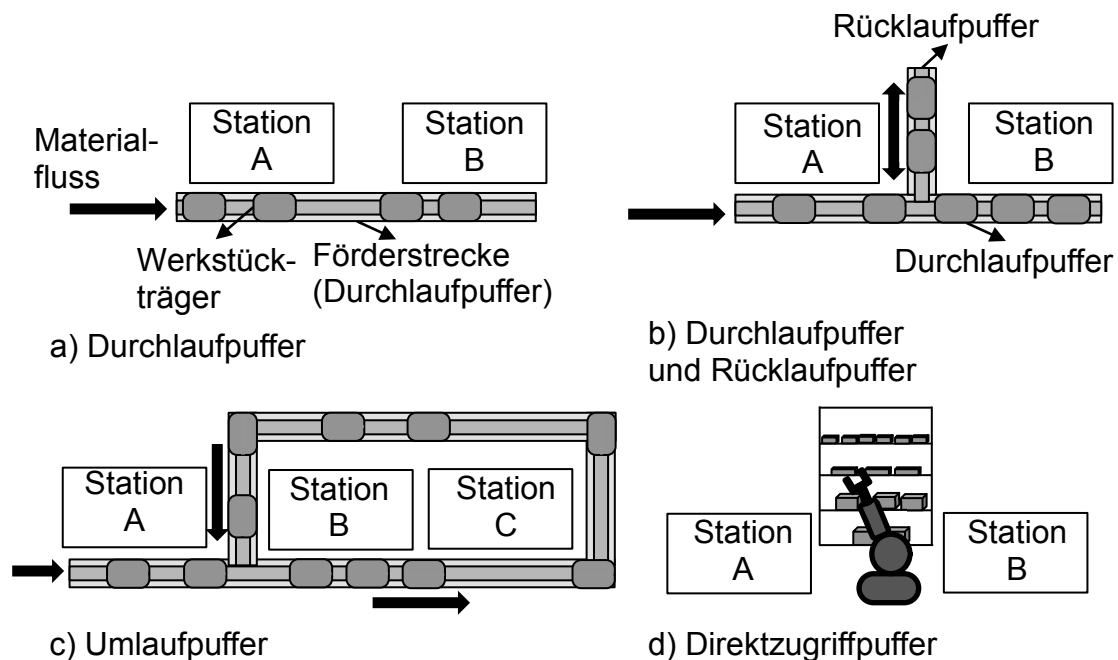


Abb. 2.4: Pufferarten nach ihrer Einbindung in die Fließsysteme, vgl. (Janisch, 1979, S. 32)

Aufgrund ihrer Anordnung im Materialfluss können Puffer in Zugangs- und Abgangspuffer unterschieden werden. Wird eine Station von einem Puffer mit Erzeugnissen bestückt, so handelt es sich um einen Zugangspuffer. Demgegenüber werden die in den Stationen bearbeiteten Erzeugnisse in Ausgangspuffer entsorgt. Bei Fließlinien können die Puffer zwischen den Stationen als gemeinsam genutzte Zu- und Abgangspuffer bezeichnet werden.

2.4 Verkettungsart

In diesem Abschnitt geht es um eine Beschreibung der Verkettungsarten in einer Fließlinie. Weiterhin wird die Pufferwirkung auf die Produktivität der Fließlinie er-

läutert. Sind keine Puffer zwischen den Stationen eingerichtet, so wird die Weitergabe eines Erzeugnisses von einer Station zur nächsten vom Zustand der jeweiligen Folgestation beschränkt. Das bedeutet, die teilweise bearbeiteten Erzeugnisse werden an allen Stationen jeweils zur selben Zeit weitergegeben. Auf diese Weise entsteht eine einheitliche Taktzeit für die Stationen. Diese Verkettungsart der Stationen bezeichnet man als starre Verkettung, vgl. Abb. 2.5. Ein Stillstand einer Station hat den Stillstand der gesamten Fließlinie zur Folge.

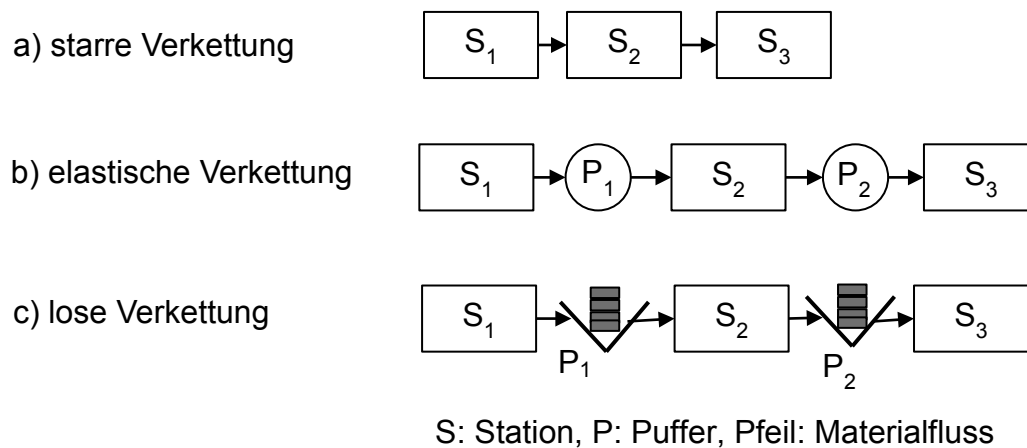


Abb. 2.5: Verkettungsarten der Fließfertigung

Sind die Stationen durch Puffer verbunden, so wird von elastischer Verkettung gesprochen. Das Hauptziel dieser Puffer besteht darin, die Wartezeiten einer Station auf Erzeugnisse bzw. die Blockierung eines Erzeugnisses in der vorangehenden Station möglichst zu vermeiden. Das bedeutet, sowohl schwankende Bearbeitungszeiten als auch kurze Störzeiten können durch Puffer ausgeglichen werden. Ein Stillstand einer Station führt nicht zwangsläufig zum Stillstand der gesamten Linie, da der nicht voll belegte Ausgangspuffer das Erzeugnis aufnimmt, solange die nächste Station belegt ist. Demzufolge wird i.d.R. bei elastischer Verkettung der Stationen eine höhere Ausbringungsmenge in einem bestimmten Zeitraum erreicht, als bei starrer Verkettung. Eine besondere Verkettungsart (lose Verkettung) liegt vor, wenn die Pufferkapazitäten zwischen den Stationen (scheinbar) unbegrenzt sind. Dabei entstehen keine Verkettungsverluste (vgl. Abs. 4.1.2 und 4.1.2) in den verketteten Stationen, vgl. (Lotter & Wiendahl, 2006, S. 395). Im Gegensatz zur elastischen Verkettung lassen sich weiterhin bei loser Verkettung langfristige Störungen kompensieren, da der Ausgangspuffer die Erzeugnisse aufnimmt, solange die mit ihm verbundene Station gestört ist.

2.5 Spezialisierungsgrad

Die zunehmenden Kundenbedürfnisse haben Wirkungen auf die Ausgestaltung von Fließmontagesystemen. So ist es heutzutage bspw. nicht mehr wirtschaftlich, ein sehr teures Fließsystem zur Herstellung einer einzelner Variante, wie z.B. Automodell mit gleicher Ausstattung und Farbe, auszugestalten. Im Folgenden wird die Spezialisierung von Produktvarianten beschrieben. Weiterhin wird nach dem Spezialisierungsgrad zwischen Fließfertigungssystemen unterschieden.

2.5.1 Produktvarianten

Bei (Domschke & Scholl, 1997, S. 250) wurden die Varianten in der Fließfertigung als „*verschiedene Ausführungen eines Grundproduktes*“ definiert. Unterscheidungen zwischen Varianten können jedoch in den beiden Ebenen von Baugruppen und Endprodukten erfolgen, vgl. (Lingnau, 1994, S. 23). Diese Unterscheidungen lassen sich als Optionen bezeichnen. Baugruppen können in vielen Fertigungssystemen als Produkte (Output des Fertigungssystems) bezeichnet werden, die aber nicht unbedingt eine Grundaufführung haben, vgl. (Boysen, 2005, S. 13). Nach DIN 199 werden Varianten als „*Gegenstände ähnlicher Form und/oder Funktion mit in der Regel hohem Anteil identischer Gruppen oder Teile*“ bezeichnet, vgl. (DIN199, 2002). In der vorliegenden Arbeit ist die Beschreibung der Produktvarianten so zu erweitern, dass sie in einem Fließsystem hergestellt werden können. Produktvarianten lassen sich durch Formen, Abmessungen, Farben, verwendete Materialien und Technologie variieren, vgl. (Wiendahl, 2004, S. 7f). Auf diese Weise lässt sich der Begriff der Variantenvielfalt zum Ausdrücken der Anzahl unterschiedlicher Ausführungsalternativen (Varianten) einer Baugruppen oder eines Produkts anwenden.

2.5.2 Einprodukt- und Mehrprodukt-Fließfertigung

Je nach der Anzahl, Art und Reihenfolge der zu fertigenden Produktvariante lassen sich die Formen der Fließsysteme in die folgenden Klassen einteilen, vgl. (Scholl A. , 1999; Kratzsch, 2000, S. 46; Bloech, Bogaschewsky, Götze, & Roland, 2004, S. 258; Boysen, 2005, S. 10f):

- Einprodukt-Fließfertigung

- Mehrprodukt-Fließfertigung¹⁰
 - Serienweise Mehrprodukt-Fließfertigung (engl. Multi-Model-Production)
 - Variantenfließfertigung (engl. Mixed-Model-Production)

Die Einprodukt-Fließfertigung entspricht der Herstellung des Autos Ford Model T. Dabei kann im Fließsystem nur ein einzelnes Produkt über längere Zeit in sehr großen Stückzahlen hergestellt werden. Dieser Art der Fertigung ist generell mit einem hohen Automatisierungs- und Standardisierungsgrad verbunden, vgl. Abb. 2.6.

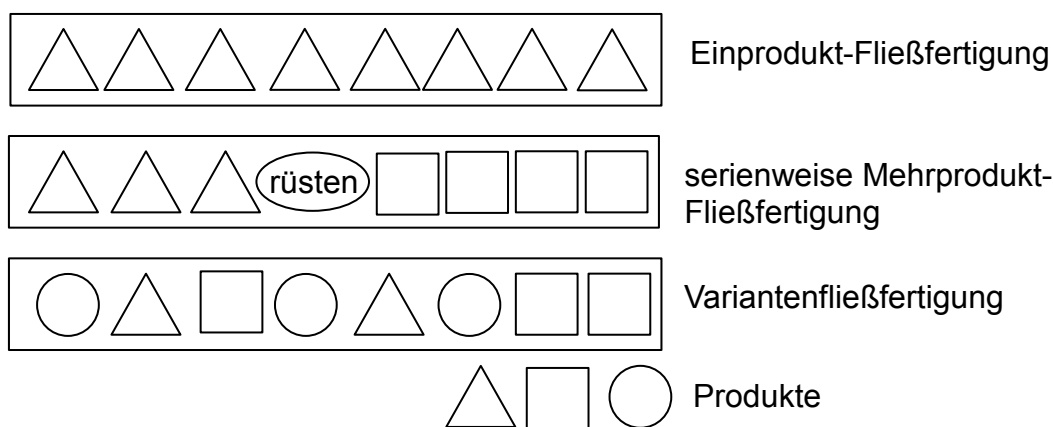


Abb. 2.6: Einprodukt- und Mehrprodukt- Fließfertigung, in Anlehnung an (Scholl A. , 1999, S. 7)

Bei der serienweisen Fließfertigung werden verschiedene Produktvarianten in bestimmten Mengen (Lose) produziert, wobei die Produkte des jeweiligen Loses gleich sind. Die Stationen in dieser Fließfertigung müssen in der Lage sein, andere Varianten nach dem Umrüsten herstellen zu können. Dadurch kann es sein, dass die Taktzeiten zur Produktion unterschiedlicher Varianten bzw. Lose veränderbar sind. In dieser Fertigungsart treten i.d.R. beim Wechsel von Varianten sowohl unterschiedliche erforderliche Umstellungsaufwände (Umrüstkosten) bzw. Umrüstzeiten als auch zusätzliche Kosten zur Lagerung von Erzeugnissen auf. Die Umrüstzeiten werden als nicht-wertschöpfende Zeit bezeichnet. In klassischen Systemen ist diese sehr lang im Vergleich zu den Stationsbearbeitungszeiten, so dass der Produktionsprozess unterbrochen ist. Beispielsweise werden in einem Automobilunternehmen Komponenten von Auspuffkrümmern in einer starren Fließlinie, die aus 28 Stationen besteht, bearbeitet, wobei die Taktzeit 24 Sekunden und die variantenunabhängige Umrüstzeit 2160 Sekunden (36 Minuten) betragen, vgl. (Günther & Tempelmeier, 2005, S. 228). Um die Rüstkosten zu reduzieren, wer-

¹⁰ In (Zäpfel, 2000, S. 214) wurde die Mehrprodukt-Fließfertigung in Fließsystemen mit losweiser und gemischter Erzeugnisfolge klassifiziert.

den die Varianten in Losen gefertigt. Dabei besteht die Problemstellung grundsätzlich darin, optimierte Losgrößen und die Bearbeitungsreihenfolge zu bestimmen. Die isolierte Behandlung dieser Probleme kann dazu führen, dass sich die Intervalle der Stationsbelegungszeiten unterschiedlicher Varianten überschneiden. Auf diese Weise spielen die Umrüstkosten bei der Auswahl der Reihenfolge, Art und Losgröße der zu fertigenden Erzeugnisse eine große Rolle.

Bei der Variantenfließfertigung können in einem Fließsystem in wahlfreier Reihenfolge unterschiedlicher Varianten gefertigt werden. In diesem Fall sollten die Rüstzeiten sehr klein sein. So bleiben sie vernachlässigbar. Die Vermeidung von Umrüstvorgängen kann durch den Einsatz von Hochtechnologie bspw. bei der Montage von Personenkraftwagen verwirklicht werden. Dabei werden meist Aufträge mit unterschiedlichen Kundenwünschen nacheinander bearbeitet. Dadurch schwanken die Bearbeitungszeiten von Variante zu Variante. Ein wesentliches Planungsproblem besteht hier darin, die Stationsleistungen aufgrund der unterschiedlichen Arbeitsumfänge abzustimmen (vgl. Abs. 3.3.3). Die Probleme der Reihenfolge- und Produktionsprogramplanung wurden in (Boysen, 2005) untersucht.

Es ist hierbei sinnvoll, einen groben Vergleich zwischen den drei oben dargestellten Arten der Fließfertigung durchzuführen. Während die serienweise Mehrprodukt-Fließfertigung durch die Fertigung von Losen, das Auftreten von Rüstkosten und die komplizierte Reihenfolge- bzw. Losgrößenplanung charakterisiert wird, weisen die Einzelprodukt-Fließfertigung und Variantenfließfertigung solche Probleme nicht auf. Weiterhin haben sie die gleichen betrieblichen Rahmenbedingungen. Insbesondere ist dabei die wahlfreie Bearbeitungsreihenfolge in der Losgröße Eins zu nennen. Jedoch steht dem Vorteil, unterschiedliche Varianten anstatt einer einzelnen Variante in gleichem Fließsystem zu fertigen, eine Abnahme des Nutzungsgrades gegenüber. Weitere Unterschiede zwischen den beiden Fertigungsarten werden im Folgenden dargestellt:

- Die Senkung des Standardisierungsgrads wegen der Zunahme der Produktvarianten kann höhere Ausbildungs- und Schulungskosten erfordern. Jedoch sind dabei die Effekte der Arbeitsmonotonie und -belastung schwächer.
- Die Investitionskosten können sich geringfügig erhöhen, da hier eventuell zusätzlicher Aufwand (neue Technologien) zur Minderung bzw. Vermeidung von Rüstkosten anzuwenden sind, vgl. (Scholl A. , 1999, S. 77).

2.6 Räumliche Anordnung

Dabei wird zwischen linearem und nichtlinearem Materialfluss unterschieden. Nichtlinearer Materialfluss liegt vor, wenn Fließströme von Erzeugnissen ausgeschleust und/oder zusammengeführt werden. In der vorliegenden Arbeit werden die Oberbegriffe der eindimensionalen (seriellen) und mehrdimensionalen (Unterbegriffe: konvergierende, divergierende und parallelen) Strukturen zur Beschreibung der räumlichen Anordnung von Fließsystemen bzw. der Art des Materialflusses erläutert.

Die Anordnung der Stationen in ein- oder mehrdimensionalen Strukturen ist grundsätzlich von der Produktstruktur abhängig. Insbesondere bei serieller Struktur müssen die herzustellenden Produkte aus einem Basiserzeugnis bestehen. Während seines Durchlaufs in der Fließlinie werden an (oder in) das Basiserzeugnis die benötigten Teile oder Baugruppen gefügt, vgl. (Kratzsch, 2000, S. 45).

2.6.1 Serielle Struktur

Zur Verwirklichung eines linearen Materialflusses sind die Stationen in Reihe nacheinander in einer Fließlinie zu schalten. Die Erzeugnisse durchlaufen die Stationen in einer Richtung und werden in einer Station nur einmal bearbeitet. Ausgehend von der Anzahl der Arbeitsgänge kann diese Anordnungsart z.B. in der Automobilindustrie zu relativ langen Fließlinien führen. Im Rahmen dieser Arbeit gilt, dass die Länge einer Fließlinie vorrangig von der Anzahl der an ihr beteiligten Stationen abhängig ist. Abhängig von der räumlichen Entfernung von Stationen sind Kontakte der Mitarbeiter oder sogar mögliche Synergien zwischen Stationen eventuell erschwert. Weitere Merkmale dieser Struktur wurden im Abs. 2.4 erläutert.

2.6.2 Konvergierende und divergierende Strukturen

Eine Fließfertigung lässt sich aufgrund der Ausschleusung oder der Zusammenführung des Materialflusses nichtlinear organisieren, so dass ein Fließsystem aus mehreren miteinander verflochtenen Fließlinien besteht, in denen Baugruppen teilweise montiert werden. Diese Strukturart ist in der Praxis zu gestalten, wenn mehrere Baugruppen zeitlich parallel zu montieren sind, die anschließend in das Basiserzeugnis der Hauptlinie eingefügt werden. Beispielsweise ist hier die Gestaltung einer eventuellen Vormontage, in der alle nicht am Basiserzeugnis vorzu-

nehmenden Tätigkeiten durchgeführt werden, vgl. (Kratzsch, 2000, S. 46), zu nennen. Der Arbeitsumfang der Vormontage ist eng mit der Produktstruktur verbunden und hängt vor allem von der Komplexität des Produkts ab. In der Automobilindustrie werden Fließlinien miteinander in einer konvergierenden Form zur Herstellung der Karosserien verbunden, vgl. Abb. 2.7, (Manitz, 2004, S. 6).

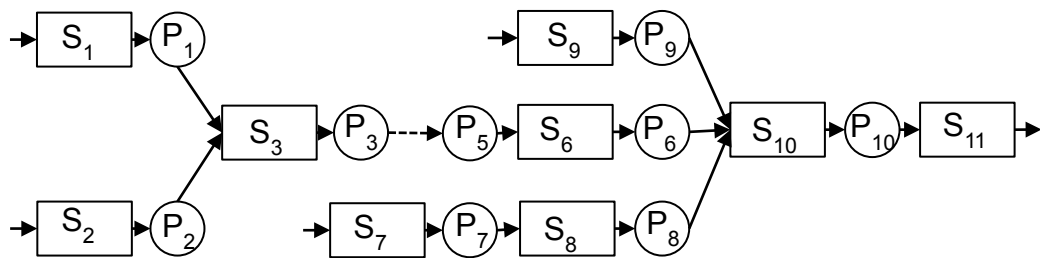


Abb. 2.7: Beispiel für eine konvergierende Struktur der Fließmontagesysteme, vgl. (Manitz, 2004, S. 6)

Ein Planungsproblem besteht darin, dass im Vergleich zu serieller Struktur die Verwirklichung eines optimierten Materialflusses zwischen den Fließlinien mit erhöhten Abstimmungs- und Koordinierungsanforderungen verbunden ist. Weitere Beispiele für konvergierende und divergierende¹¹ Strukturen in der Fließmontage finden sich bei (Helber, 1999; Buzacott & Shanthikumar, 1993).

Eine besondere Struktur mit einer Ausschleusung und Zusammenführung ist in Nachbearbeitungsschleifen anzutreffen. Bei der Ausführung eines Fertigungsprozesses wird ein Null-Fehler-Prozess angestrebt. Dieser ist jedoch praktisch nicht erreichbar. Nacharbeit ist daher in der Fertigung erforderlich, um Fehler bei der Herstellung von Erzeugnissen bzw. Produkten zu beheben. In der Praxis werden häufig Nachbearbeitungsstationen zur Behebung typischer Fehler, z.B. elektronischer Fehler, oder zur Auswechslung von schadhaften Teilen ausgelegt. Der Materialfluss zwischen den Haupt- und Nebenlinien lässt sich als Nachbearbeitungsschleife bezeichnen, so dass fehlerhafte Produkte aus der Hauptlinie ausgeschleust, in die Nebenlinie geschoben, nachbearbeitet und anschließend wiederum in die Hauptlinie gebracht werden, vgl. Abb. 2.8.

¹¹ Grundsätzlich entsteht eine divergierende Produktstruktur, wenn „aus einem Vorprodukt stufenweise mehrere Endprodukte hergestellt“ werden, vgl. (Domschke & Scholl, 1997, S. 13). Bei der Definition der Strukturen von Fließsystemen wird in dieser Arbeit angenommen, dass die Nachbearbeitungsschleife die konvergierende und divergierende Struktur beinhaltet.

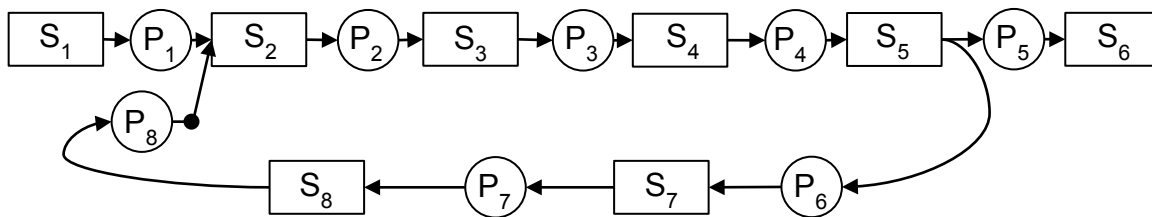


Abb. 2.8: Beispiel für eine Nachbearbeitungsschleife, vgl. (Helber, 1999, S. 160)

2.6.3 Parallele Struktur

2.6.3.1 Parallele Arbeitsgänge bzw. Stationen

Die Ausbringungsmenge am Ende einer Fließlinie hängt grundsätzlich von der Taktzeit der Linie ab. Um während eines Planungszeitraums die Anzahl der gefertigten Erzeugnisse zu erhöhen, ist die Fertigungsgeschwindigkeit bzw. der Durchsatz zu erhöhen, der dem Kehrwert der Taktzeit gleicht. Das heißt, die Taktzeit muss verringert werden. Das kann jedoch meist dann nicht verwirklicht werden, wenn der Station mit der längsten Bearbeitungszeit nur ein (nicht weiter teilbarer) Arbeitsgang zugeordnet wird. Das Problem ist wirtschaftlich durch das Einführen paralleler Stationen oder durch Duplizierung der Arbeitsgänge trotzdem lösbar. Im letzteren Fall entstehen gleichartig parallele Stationen mit Inhalten gleicher Arbeitsgänge, vgl. (Domschke & Scholl, 1997, S. 233ff).

2.6.3.2 Gleichartige parallele Fließlinie

Nicht nur die Einführung von parallelen Stationen bringt wirtschaftliche Vorteile mit sich, sondern auch die Konfiguration von gleichartig parallelen Fließlinien anstatt einer seriellen Fließlinie kann vorteilhaft sein. Die Parallelisierung von Fließlinien ist zwar nicht neu, wurde aber nicht umfassend in der Fachliteratur untersucht. Im Folgenden werden hauptsächlich zwei Modelle dargestellt.

Modell von Daganzo und Blumenfeld

In (Daganzo & Blumenfeld, 1994) wurde am Beispiel der Automobilindustrie durch eine mathematische Vorgehensweise und unter bestimmten Bedingungen ein Zusammenhang zwischen Lohn-, Maschinenkosten, Durchsatz und der optimalen Anzahl paralleler Fließmontagelinien vorgestellt. Dabei wurde von starr verketteten hybriden Fließsystemen ausgegangen. Die Anzahl der Mitarbeiter (Team) pro Station ist gleich. Jeder Station wird nur ein Arbeitsgang zugeordnet. Die Arbeitsgänge sind nicht gleich und werden mit unterschiedlichen deterministischen¹²

¹² Die Bearbeitungszeitschwankungen, die sich bei dem Handarbeitsteil ergeben können, wurden hier sehr gering angenommen, so dass sie im Vergleich zu Bearbeitungszeiten vernachlässigt werden können.

(oder fast deterministischen) Bearbeitungszeiten ausgeführt. Zwei Konfigurationsalternativen wurden hierbei untersucht: serielle Struktur mit 8 Stationen und parallele Struktur (2 parallele Linien) jeweils mit 3 Stationen, vgl. Abb. 2.9.

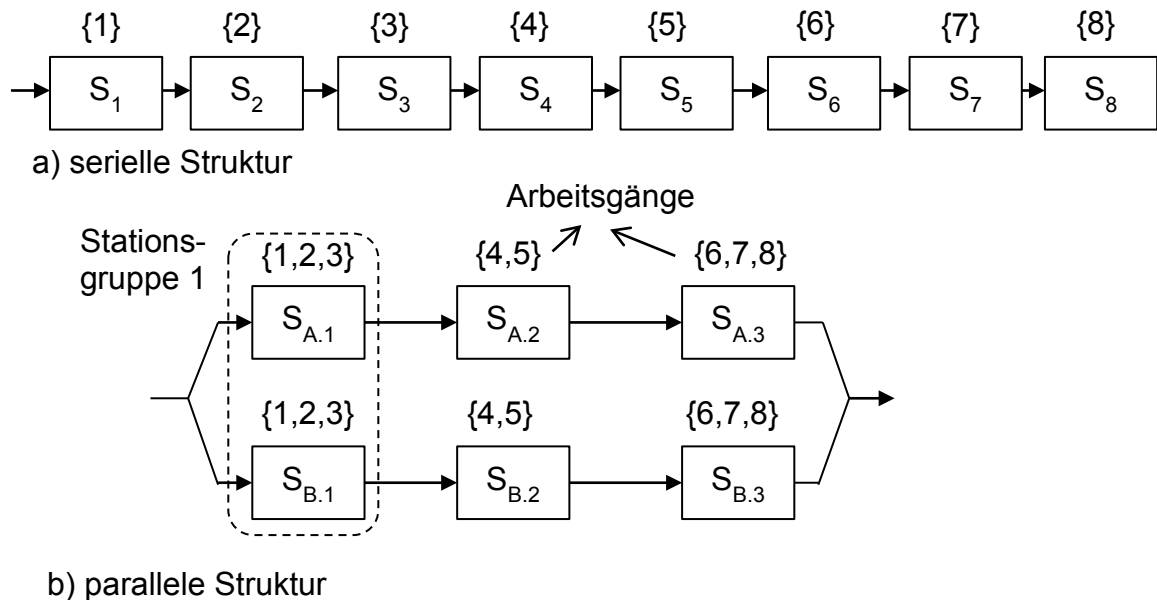


Abb. 2.9: Untersuchte serielle und dementsprechende parallele Strukturen, in Anlehnung an (Daganzo & Blumenfeld, 1994)

In der parallelen Struktur, wobei den Stationen jeweils mehrere Arbeitsgänge zugewiesen werden können, sind die Lohnkosten tendenziell geringer im Vergleich zur seriellen Struktur, denn die Verlustzeiten in den Stationen sind geringer. Die Verlustzeiten ergeben sich aus dem Unterschied zwischen den Bearbeitungszeiten von Arbeitsgängen und dem Erzeugnistransport zwischen den Stationen. Eine weitere Reduzierung der Verlustzeiten tritt ein, wenn die parallelen Stationen als gemeinsame Stationsgruppen bezeichnet werden, so dass die Mitarbeiter einer Gruppe zwischen den parallelen Stationen der Gruppe wechseln und innerhalb des Taktes in den beieinander liegenden Stationen arbeiten können. Die folgende Formel wurde entwickelt:

$$N = Qu \{ 1 + \sqrt{L\bar{t}/(M_k u)} \} \quad (2.1)$$

Legende:

N: Anzahl paralleler Fließlinien; L: jährliche Lohnkosten pro Team der Mitarbeiter, die in einer Station tätig sind; Q: Durchsatz; M_k: mittlere Maschinenkosten pro Jahr; \bar{t} : mittlere Bearbeitungszeit der Arbeitsgänge; u: mittlere Verlustzeit auf einer Station pro Erzeugnis

Je höher das Verhältnis zwischen Lohn- und Maschinenkosten (L/M_k) ist, desto wirtschaftlicher kann die Parallelisierung gleichartiger Fließlinien sein, wobei eine bessere Auslastung der Mitarbeiter in parallelen Stationen erreicht werden kann. Weiterhin ist bemerkbar, dass nach der Formel (2.1) die Anzahl paralleler Linien proportional zu dem Durchsatz ist und weiterhin von entstehenden Verlustzeiten abhängt.

Modell von Zäpfel

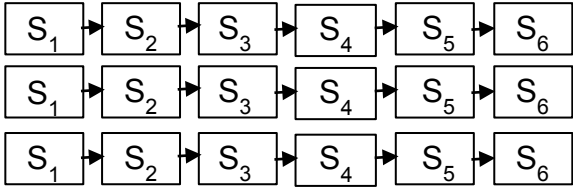
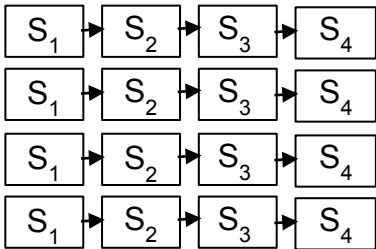
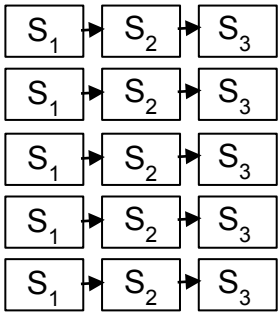
Der Hauptgrund zur Einrichtung paralleler Fließlinien bzw. -abschnitte ist die Erreichung einer vorgegebenen Ausbringungsmenge, wenn die längste Bearbeitungszeit der Stationen einem Vielfachen der erforderlichen Taktzeiten entspricht. Um die Mengenleistung paralleler Fließlinien abzustimmen, wurde zu diesem Zweck in (Zäpfel, 2000, S. 214ff) die Formel (2.2) entwickelt.

$$\text{Soll-Leistung} = \frac{\text{Arbeitszeit}}{\text{Taktzeit}} \cdot \text{Anzahl paralleler gleichartiger Fließlinien} \quad (2.2)$$

Diese Gleichung beschreibt die Beziehung zwischen der Anzahl paralleler Linien, Stationsanzahl per Linie und Taktzeit. Dabei wird von deterministischen Bearbeitungszeiten und störungsfreien Stationen ausgegangen.

Unter Beachtung des in Abb. 2.3 dargestellten Vorranggraphen und mit Berücksichtigung einer gewünschten Soll-Leistung von zwei Erzeugnissen (oder Produkten) pro Zeiteinheit (ZE) lassen sich drei zulässige Strukturalternativen für das Fließsystem konfigurieren, vgl. Abb. 2.10.

Dabei wird angenommen, dass die geplante Soll-Leistung 72000 Stücke pro Planperiode beträgt. Die Arbeitszeit pro Periode gleicht 144000 ZE. In der ersten Alternative werden drei parallele gleichartige Fließlinien ($N= 3$) benötigt, weil die gewünschte Taktzeit dreimal geringer als die erreichbare Taktzeit ($C= 6$ ZE) ist. Dabei ist eine Duplizierung der Stations-, bzw. Linienanzahl erforderlich. In der zweiten und dritten Alternative werden die Anzahl der Fließlinien erhöht und gleichzeitig die Stationsanzahl (M) in der jeweiligen Fließlinie reduziert.

Struktur- alternative	Struktur des Fließsystems	zulässige Zuordnung der Arbeitsgänge auf die Arbeitsstationen
Alternative 1: $M = 6$ $C = 6$ $N = 3$ $M_{\text{ges}} = 18$	Anzahl paralleler Linien: 3 	$S_1 = \{1\}$ $S_2 = \{2,4\}$ $S_3 = \{3,7\}$ $S_4 = \{5\}$ $S_5 = \{6\}$ $S_6 = \{8\}$
Alternative 2: $M = 4$ $C = 8$ $N = 4$ $M_{\text{ges}} = 16$	Anzahl paralleler Linien: 4 	$S_1 = \{1,4\}$ $S_2 = \{2,3\}$ $S_3 = \{5,7\}$ $S_4 = \{6,8\}$
Alternative 3: $M = 3$ $C = 10$ $N = 5$ $M_{\text{ges}} = 15$	Anzahl paralleler Linien: 5 	$S_1 = \{1,2\}$ $S_2 = \{3,4,6\}$ $S_3 = \{5,7,8\}$

Legende:

M : Stationsanzahl in der Fließlinie, M_{ges} : Stationsanzahl im gesamten System, C : Taktzeit, N : Anzahl paralleler Fließlinien, S_k : Belegung der Station k mit Arbeitsgängen

Abb. 2.10: Strukturalternativen für Fließsystem bezüglich des in Abb. 2.3 dargestellten Vorranggraphen, vgl. (Zäpfel, 2000, S. 215)

Weitere Modelle

Bei der Parallelisierung von Fließmontagesystemen entsteht vor allem das Problem der Fließbandabstimmung¹³ von mehr als einer Linie. Viele Verfahren bzw. Algorithmen zur Lösung dieses Problems finden sich z.B. in (Pinto, Dannenbring, & Khumawala, 1975; Pinto, Dannenbring, & Khumawala, 1981; Ahmadi, Dasu, &

¹³ Vgl. Abs. 3.3.

Tang, 1992; Benzer, Gökçen, Çetinyokuş, & Çerçioğlu, 2007; Özcan, Çerçioğlu, Gökçen, & Toklu, 2010).

Insbesondere in der Elektroindustrie sind häufig parallele serienweise Fließlinien anzutreffen. Beim Variantenwechsel entstehen Umrüstkosten, die gleich oder unterschiedlich ausfallen können. Ziel der Parallelisierung besteht hierbei darin, die Umrüstzeiten bzw. Umrüstkosten zu reduzieren. Dabei wurden Lösungsansätze entwickelt, in denen die Varianten in Produktfamilien gegliedert werden. Es wird angestrebt, optimierte Bearbeitungsreihenfolgen unterschiedlicher Varianten zu planen. Bei Herstellung von Varianten einer Familie ergeben sich nahezu gleiche Umrüstkosten, vgl. (Ahmadi, Dasu, & Tang, 1992; Balakrishnan & Vanderbeck, 1999). In der Dissertation von (Monkman, 2006) wurde die Suche nach dem Optimum als (engl.) „Product Family Scheduling Problem“ bezeichnet. Dabei wurden drei unterschiedliche Lösungsansätze entwickelt. Im ersten Ansatz sind die unverzüglichen Terminierungen (engl.) „Company’s Immediate Scheduling Difficulties“ zu berücksichtigen. An dieser Stelle wird angenommen, dass die Umrüstkosten ähnlich genug sind, um die Varianten unabhängig von den daraus resultierten Umrüstkosten zu bearbeiten. In zweiten und dritten Ansätzen sind je nach der Komplexität der Umrüstvorgänge die Reihenfolgeplanung bzw. Losgrößen (Umrüstkosten) durch entwickelte heuristische Schritte zu optimieren. In jedem Schritt ist ein individuelles Optimierungsprogramm anzuwenden. In jedem Fall sind die aus der Heuristik entstehenden unterschiedlichen Lösungsalternativen zu vergleichen.

2.6.4 Fertigungssegmentierung

Um Zielsetzungen, z.B. Reduzierung der Durchlaufzeit und Bestände sowie Erhöhung des Durchsatzes, in einem mehrdimensionalen Fertigungssystem zu erreichen, reicht es nicht aus, individuelle Verbesserungen von Maßnahmen in jeweils einer Fließlinie zu implementieren. Vielmehr ist es erforderlich, das ganze System in Segmente einzuteilen, mit dem Ziel, alle Verschwendungsursachen möglichst zu vermeiden (Wildemann, 1990). Dabei sind alle Relationen zwischen Kapazitätsnutzungsgraden, Durchlaufzeiten und Beständen zugleich zu betrachten bzw. zu berücksichtigen. Eine Synchronisierung der Fertigungsprozesse bzw. -segmente führt vor allem zur Reduzierung der Durchlaufzeit und wirkt sich positiv auf die Bestandsminimierung aus. Um den Kapazitätsnutzungsgrad zu erhöhen genügt es nicht, die Stationen auf jeweils ein Segment abzustimmen, sondern es ist notwendig, die Leistungen bzw. Durchsätze verketteter Segmente abzugleichen, d.h. durch die Harmonisierung verbundener Segmente. Bestände lassen sich erheblich

durch die Realisierung eines Fließsystems zwischen den verbundenen Stationen bzw. Segmenten reduzieren.

Um Segmente in der vorliegenden Arbeit genau zu definieren, wird dieser Begriff mithilfe der oben beschriebenen räumlichen Anordnung beschrieben:

- Jede Fließlinie in der seriellen Struktur bildet ein Segment.
- Eine parallele Struktur lässt sich als ein Einzelsegment bezeichnen.
- Jede Fließlinie (nicht parallelisiert mit einer anderen Linie) in der konvergierenden und/oder divergierenden Struktur kann ein Segment darstellen, an ihren Grenzen erfolgt eine Zusammenführung oder Ausschleusung von Erzeugnissen oder Produkten. Die Taktzeiten dieser Segmente können unterschiedlich sein.

2.6.5 Bewertung von Strukturalternativen

Bei der Entscheidung über eine geeignete Strukturalternative sind nicht nur quantifizierbare Kriterien, bspw. die Minimierung des Investitionsaufwandes bzw. die Gewinnmaximierung, zu berücksichtigen, sondern es spielt häufig die Berücksichtigung unterschiedlicher Flexibilitäts- und Synergieeffekte eine große Rolle, die sich in sach- und personenbezogene Kriterien untergliedern lassen, vgl. (Zäpfel, 2000, S. 219). Die unterschiedlichen Bewertungskriterien werden durch Abb. 2.11 zusammengefasst.

Die Bewertung von Investitionsalternativen ist grundsätzlich mit einer entsprechenden Fließbandabstimmung verbunden. Hauptsächlich gehören zu diesen die Kosten von Betriebsmitteln und Flächen sowie auch Förder-, Puffer- und Lagereinrichtungen. In der Betriebsphase treten verschiedene Arten von Kosten auf, bspw. Personal-, Steuerungs-, Energie-, Instandhaltungs-, Nachbearbeitungs-, Ausschuss-, Kapitalbindungskosten etc. Weitere eventuelle Kosten wie z.B. die Qualifizierungs- und Schulungskosten der Mitarbeiter oder der Einsatz von Springern¹⁴ sind bei der Bewertung zu kalkulieren. Detaillierte Informationen über die relevanten Ressourcen- und Kostenarten in der Montage finden sich in (Kratzsch, 2000).

Flexibilität kennzeichnet sich als ein strategischer Erfolgsfaktor angesichts ständig veränderter Rahmenbedingungen. Sie wurde bei (Altrogge, 1979, S. 605) als „*die Eigenschaft der Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Situationen*“ definiert.

¹⁴ Springer sind hoch qualifizierte Mitarbeiter. Sie können in verschiedenen Stationen arbeiten und sind deshalb hoch zu bezahlen, vgl. (Domschke, Klein, & Armin, 1996).

Unter Anpassungsfähigkeit ist einerseits die Reaktionsfähigkeit an externe Einflussgrößen zu verstehen, wie z.B. Produktartänderungen und Auftrags- bzw. Mengenschwankungen, und andererseits ist die Schaffung von Freiheitsgraden zur Bewältigung von intern entstehenden Störungen zu ermöglichen, vgl. (Kuhn, 1990, S. 12ff).



Abb. 2.11: Ausgewählte Ziele bei der Bewertung von Strukturalternativen in Anlehnung an (Zäpfel, 2000, S. 218; Kratzsch, 2000)

Bei geringer Variantenanzahl lässt sich dieses Flexibilitätsziel durch die Auslegung redundanter Fließsysteme erreichen. Um auf Mengenschwankungen reagieren zu können, sind weiterhin die Auslegung von Lagersystemen und Redundanzen von Bedeutung. Des Weiteren dienen Puffer zum Abfangen von Störungswirkungen. Existieren Redundanzen im System, so werden während der Stördauer die Erzeugnisse in der entsprechenden redundanten Station bearbeitet oder in einem Puffer bevorratet.

Im Allgemeinen kann ein Fließsystem auf interne und externe Einflussgrößen durch Redundanz reagieren. Die Bereitstellung von Flexibilitätspotenzialen verursacht aber zusätzliche Kosten, die eventuell den daraus resultierenden Vorteilen gegenüberstehen, vgl. (Voigt & Wildemann, 2007, S. 124). Bei Nachfrageschwankungen besteht die Herausforderung darin, die Anpassung der Personalkapazität an die Veränderung der Systemnutzungsdauer zu ermöglichen, d.h. über Kurzarbeit oder Überstunden ist die Arbeitszeit an den unterschiedlichen Arbeitsanfall im Jahresverlauf anzupassen. Die Nutzung von Jahresarbeitszeitkonten ist heute üblich.

Bei der Bewertung eines Fließsystems müssen Zielkriterien auf konkrete Konfigurationsentscheidungen (z.B. automatisierte oder manuelle Arbeitsgänge) und Strukturpotenzialen bezogen werden. Um Strukturpotenziale zu bewerten, lassen sich in der Praxis Vorgehensweisen und Verfahren der Nutzwertanalyse nutzen, die nicht Gegenstand dieser Arbeit sind. Mehr darüber findet sich bei z.B. (Metzger & Helmut, 1977; Picot, Reichwald, & Behrbohm, 1985; Zäpfel, 2000). In der vorliegenden Arbeit geht es u.a. um einen groben Vergleich von Strukturalternativen unter Berücksichtigung des Zielkatalogs.

2.7 Auftragseingang als Einflussfaktor

Ein wesentlicher Faktor, der einen großen Einfluss auf die Konfiguration und den Betrieb von der Fließfertigungssystemen hat, stellt das Verhalten des Auftretens von Aufträgen und weiterhin des Absatzes von Produkten dar. In diesem Zusammenhang wird zwischen markt- und auftragsorientierter Fertigung unterschieden. Insbesondere ist dabei das Phänomen der Nachfrageschwankung zu behandeln.

2.7.1 Markt- und Auftragsorientierte Fertigung

Bei marktorientierter Fertigung (Marktfertigung) wird für anonyme Märkte produziert. In diesem Fall sind die einzelnen Kunden im Zeitpunkt der Produktion nicht bekannt. Die zu fertigenden Erzeugnisse bzw. Produkte lassen sich unabhängig von einem bestimmten Kundenauftrag herstellen. Jedoch können die Absatzerwartung und die Nachfrageentwicklung aufgrund von Marktanalysen und Bedarfsprognosen eine Orientierungshilfe bieten. Dabei besteht die Aufgabe der Programmplanung darin, die Varianten und auch Mengen unterschiedlicher Produkte in einem Planungszeitraum festzulegen, vgl. (Czeranowsky, 1974, S. 3f). Typi-

scherweise erfolgt der Verkauf der Produkte nicht unmittelbar nach der Produktion. Vielmehr werden diese in Lagern bevorratet und ab Lager verkauft, um marktübliche Lieferzeiten zu gewährleisten. Deshalb wird hier von Lagerfertigung gesprochen.

Unter auftragsorientierter Fertigung (Auftragsfertigung) versteht man, dass die Produktion erst durch das Auftreten von Aufträgen ausgelöst wird. Deshalb bezeichnet man diesen Produktionstyp als Bestellfertigung oder Kundenfertigung. Die Produktionsplanung orientiert sich an den schon eingegangenen Kundenaufträgen, wobei nicht nur Kundenwünsche zu berücksichtigen sind, sondern auch die möglicherweise während der Fertigung entstehenden Schwankungen der Kapazitätsnutzungsgrade. Es wird angestrebt, vor allem die Liefertermine einzuhalten, vgl. (Boysen, 2005). Unter Kundenwünschen sind die von Kunden spezifisch bestellten Eigenschaften (Anforderungen) der Endprodukte zu verstehen. Aufgrund eventuell geänderter Kundenwünsche und neuer Aufträge können bei dieser Fertigungsart keine sicheren Informationen über „*Menge, Liefertermin und Produktspezifikation bestehen*“, vgl. (Wenger, Geiger, & Kleine, 2011, S. 183). Dadurch besteht eine besondere Herausforderung darin, Material- und Informationsfluss so zu integrieren, dass termingerechte Fertigung oder Anlieferung von Erzeugnissen zu berücksichtigen ist (JIT), vgl. (Neu, 2005, S. 11). Eigentlich kann die Fließfertigung sowohl in der Marktfertigung als auch in der Auftragsfertigung eingesetzt werden. Angestrebt wird allerdings meist eine Fließfertigung mit minimaler Lagerhaltung von Fertigprodukten.

2.7.2 Auftragsschwankung

Die Änderung des Kundenverhaltens, die Verkürzung der Produktlebenszyklen und die zunehmende Produktvariation sind Ursachen für die Absatzveränderung, die weiterhin einen großen Einfluss auf die Schwankungen der Fertigungsaufträge in der Montage hat. Nach (Krüger A. , 2004, S. 18f) lassen sich die Absatzveränderungen in einmalige und schwankende Veränderungen (Marktveränderung bzw. Nachfrageschwankungen) gliedern. Einmalige Veränderungen ergeben sich aus einer Verschiebung der Marktnachfrage. Diese Verschiebung kann diskontinuierlich (unvorhersehbar) oder kontinuierlich vorkommen. Mit schwankenden Nachfrageveränderungen handelt es sich um zyklische und sich wiederholende Nachfrageschwankungen, die weiterhin unregelmäßig oder regelmäßig erfolgen, vgl. Abb. 2.12.

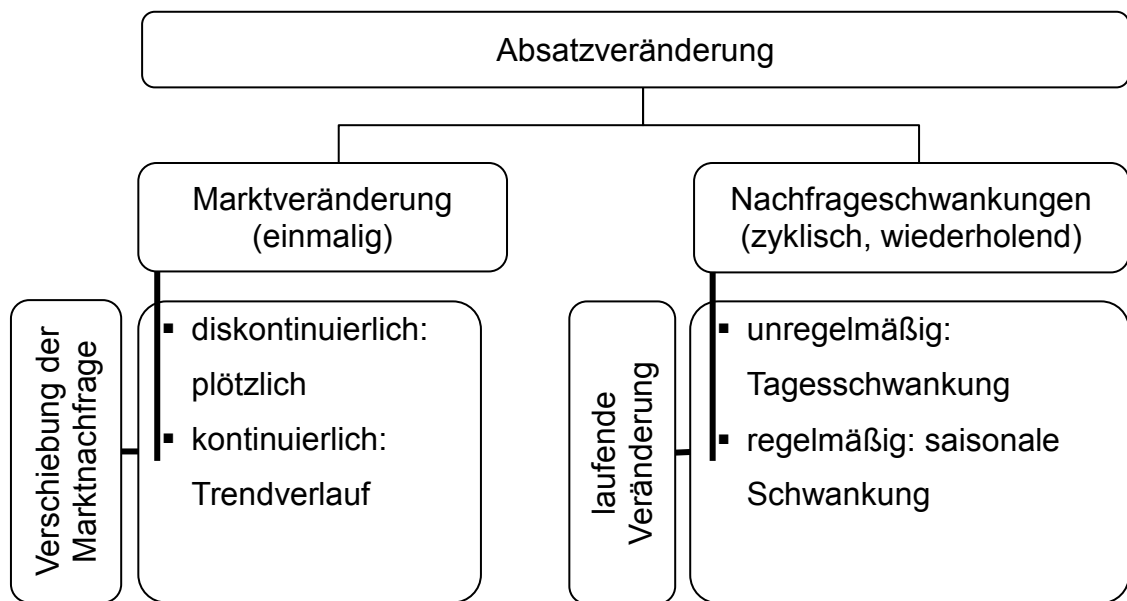


Abb. 2.12: Klassifizierung von Absatzveränderungen, in Anlehnung an (Krüger A. , 2004, S. 19; Scholl & Deuse, 2009, S. 7)

Bezüglich ihrer Höhe und Fristigkeit lassen sich Nachfrageschwankungen im Allgemeinen in kurzfristige (z.B. über den Tag) und saisonale Schwankungen klassifizieren. Saisonale Schwankungen finden sich z.B. in der Elektro-, Konsumgüter- und Bekleidungsindustrie, wobei „*Spitzenlasten von 100-300 % über dem gemittelten Jahresdurchschnitt auftreten*“ können, vgl. (Scholl & Deuse, 2009, S. 14).

Um unerwartete Auftragsschwankungen in der Montage zu bewältigen, sind Anpassungsmaßnahmen an die Kapazitäten zu berücksichtigen. Das Problem verschärft sich, wenn die Auftragsschwankungen nicht über ein Lagersystem ausgeglichen werden können.

2.8 Ziel- und Einflussgrößen

Die Hauptzielgrößen der prozessorientierten Gestaltung und des Betriebs von Fertigungssystemen lassen sich in Zeit, Kosten und Qualität zusammenfassen, vgl. (Eversheim, 1995). Die Maximierung einer Zielgröße kann i.d.R. zur Verschlechterung der beiden anderen führen. Deshalb wird meist ein Gesamtoptimum angestrebt. Dabei sollen alle Einflussgrößen auf die Prozessoptimierung und ihre Wechselwirkungen berücksichtigt werden. Aus der Vielzahl dieser Einflussgrößen sei im Folgenden separat auf die Durchlaufzeit bzw. Termintreue, den Durchsatz (Basis der Konfiguration von Fließlinien), und Bestand bzw. die Lagerhaltungskosten eingegangen, mit dem Ziel, diese und ihre Einflüsse besser zu erläutern.

Worauf im ersten Kapitel bereits hingewiesen wurde, stellt die Verbesserung dieser Größen, auch als logistische Kenngrößen bezeichnet, die Oberziele im Zielkatalog dar.

2.8.1 Durchlaufzeit und Termintreue

Die Durchlaufzeit wird aus Bearbeitungs-, Transport- und Liegezeiten gebildet. Sie beschreibt die Zeitspanne von der Auftragsfreigabe bis zur Fertigstellung des Auftrags. Die Zielgrößen Zeit, Kosten und Qualität in einem Unternehmen werden direkt von der erreichten Durchlaufzeit beeinflusst, vgl. (Wildemann, 2001). Qualität ist nicht nur von Produktmerkmalen und Funktionen abhängig, sondern auch von den Kundenerwartungen. Eine Verbesserung der Wettbewerbsposition eines Unternehmens ist durch zeitoptimale und effiziente Gestaltung der Fertigungs- und Logistikprozesse möglich. Eine deutliche Reduzierung der Durchlaufzeit kann durch planerische und organisatorische Maßnahmen erreicht werden, wobei eine synchronisierte Ausführung der Fertigungsprozesse angestrebt wird. Die Durchlaufzeit dominiert die Höhe und Dauer der Kapitalbindung in den verschiedenen Fertigungsstufen. Eine hohe Durchlaufzeit führt häufig zu einer Verspätung der Auslieferung und dadurch zu einer schlechten Termintreue. Die Wettbewerbsfaktoren Lieferzeit und Termintreue gewinnen immer mehr an Bedeutung. Eine maßgebliche Herausforderung zur perfekten Planung eines Auftrags vom Beginn bis zum Ende einer Wertschöpfungskette ist eine hochgradige Termintreue. Die Kunden interessieren sich bei einer auftragsorientierten Fertigung für den genauen Auslieferungszeitpunkt der Produkte. Es ist hier von Bedeutung, die Kenngröße „Terminabweichung“ zu definieren. Sie bezeichnet die Differenz zwischen zugesagtem Liefertermin und dem Zeitpunkt, zu dem der Auftrag gefertigt bzw. ausgeliefert wird. Wenn Liefertermine nicht eingehalten werden, treten zusätzliche Kosten auf. Diese Verspätungskosten können je nach der Situation in Form von Preisnachlässen, Konventionalstrafen oder Erlösentgang durch die Stornierung des bestehenden Auftrags entstehen. Außerdem kann niedrige Termintreue zum Auftragsentgang in der Zukunft führen, vgl. (Seelbach, 1975, S. 37; Kuhn, 1990, S. 39).

Die Durchlaufzeit lässt sich in wertschöpfende (Bearbeitungszeiten) und nicht-wertschöpfende Zeitanteile aufteilen. Zu nicht-wertschöpfenden Zeitanteilen gehören geplante und ungeplante Wartezeiten sowie Lagerungs-, Prüfungs-, Transportzeiten etc. Dabei beinhalten die Wartezeiten die Ausfall- und Störzeiten sowie Folgeausfallzeiten. Grundsätzlich entsteht ein Stillstand auf einer Maschine, wenn

keine Aufträge zur Bearbeitung bereitstehen und wenn diese Maschine blockiert oder außer Betrieb ist.

2.8.2 Durchsatz

Der Durchsatz eines Fließsystems bezeichnet die Ausbringungsmenge, die innerhalb eines bestimmten Zeitraums das System verlässt. Ein Zeitraum kann eine Stunde, Schicht, Tag, Monat etc. sein. Bei Fließlinien wird der Durchsatz oder das Leistungsvermögen der Linie durch den Durchsatz der Engpassstation begrenzt. Die Engpassstation wird als die Station mit höchster durchschnittlicher Bearbeitungszeit bezeichnet. In der Praxis ist zu beachten, dass Durchsatzströme stationär oder zeitabhängig, getaktet oder stochastisch sein können. Dabei ist die Bestimmung des Zeitraums, in dem der Durchsatz bemessen wird, von großer Bedeutung.

2.8.3 Bestände bzw. Lagerhaltungskosten

Bestände stellen alle Erzeugnisse und Produkte dar, die sich im Lager oder in der Fertigung befinden. Die Bestandshöhe in einem Fertigungsprozess ist im Allgemeinen mit der Durchlaufzeit verknüpft, d.h. bei langer Durchlaufzeit sind Liegezeiten, Lager- und Sicherheitsbestände höher. Die Reduzierung von Beständen ist von großer Bedeutung, da die hohe Kapitalbindung auf die Wirtschaftlichkeit drückt, wobei die Bestände etwa 34 % des betrieblichen Umlaufvermögens in Unternehmen binden können, vgl. (Wildemann, 2001). Hohe Bestände bedeuten auch große Lagerungsplätze, aufwändige Lagerhilfsmittel, teure Software-Systeme und mehr Mitarbeiter zur Lagerverwaltung. Weiterhin besetzen die Bestände entlang der Wertschöpfungskette auch wertvolle Fläche in Fertigungshallen. Außerdem schwächen Bestände die Transparenz in der Fertigung und führen häufig zur Entstehung von Fehlern im Ablauf. Sie verdecken die Folgen von Maschinenausfällen, unabgestimmten Kapazitäten, fehlender Flexibilität, Ausschuss und Qualitätsmängeln.

Wenn bei Fließfertigung kurzfristige Störungen auftreten, bieten die Puffer bzw. kurzfristige Zwischenspeicherung von Beständen die Möglichkeit, die Wirkungen dieser Störungen erheblich zu mindern.

2.9 Zusammenfassung Kapitel 2

Aufgrund der Komplexität von Fließmontagesystemen und deren vielfältigen unterschiedlichen Planungsproblemen werden diese Systeme nach unterschiedlichen Kategorien dargestellt. Somit lassen sich ihre Eigenschaften eindeutig erläutern. Die räumliche Anordnung erlaubt einen breiten Überblick zu allen Systemkomponenten und den Zusammenhängen zwischen ihnen. Die Gliederung von Fließfertigungssystemen nach dem Spezialisierungsgrad ist von größerer Bedeutung für die Klassifizierung der Planungsprobleme der drei ziemlich unterschiedlichen Fließfertigungsarten: Einprodukt-Fließfertigung, serienweise Mehrprodukt-Fließfertigung und Variantenfließfertigung. Diese Fertigungsarten werden häufig unter Berücksichtigung einzelner Kategorien oder Systemstrukturen untersucht. Die Unterscheidung der Fertigung nach dem Auftragseingang ist weiterhin von Bedeutung. In der Betriebsphase sind die Kapazitätsbelastungen eng mit der Auftragsschwankung und Absatzveränderung verknüpft.

Die in Abs. 2.6.5 dargestellten Bewertungskriterien werden weiterhin zur Auswertung von vorgeschlagenen und untersuchten Strukturalternativen benutzt.

3 Gestaltung von Fließfertigungssystemen

Planungsprozesse lassen sich grundsätzlich in Abhängigkeit von Planungsfristigkeit und auch -wichtigkeit in kurzfristige, mittelfristige und langfristige Prozesse unterteilen. Dementsprechend sind sie in einzelne miteinander verbundene Planungsaufgaben bzw. Planungselemente zu zerlegen. Traditionell werden diese auf die Konfigurations- und Betriebsphase (vgl. Kapitel 4) verteilt. Im Rahmen der Konfigurationsplanung werden die Hauptplanungsschritte dargestellt. Der Fokus liegt aber auf den Planungsschritten, die vor allem Einfluss auf die Leistung des Fließsystems haben. In diesem Zusammenhang werden Grundlagen bzw. Verfahren für die Fließbandabstimmung, Dimensionierung von Puffern und Nachbearbeitungsschleifen sowie Instandhaltung dargestellt.

3.1 Konfigurationsphase

Im Rahmen der Konfiguration eines Fließfertigungssystems sind viele Entscheidungen im hierarchischen Planungssystem zu treffen. Es wird angestrebt, eine kostengünstige Konfigurationslösung zu suchen, vor allem um einen gewünschten Durchsatz zu erreichen. Die Planungsschritte lassen sich i.d.R. in Arbeitsanalyse, Dimensionierung und Ausgestaltung unterteilen, vgl. Abb. 3.1 und (Kuhn, 1998).

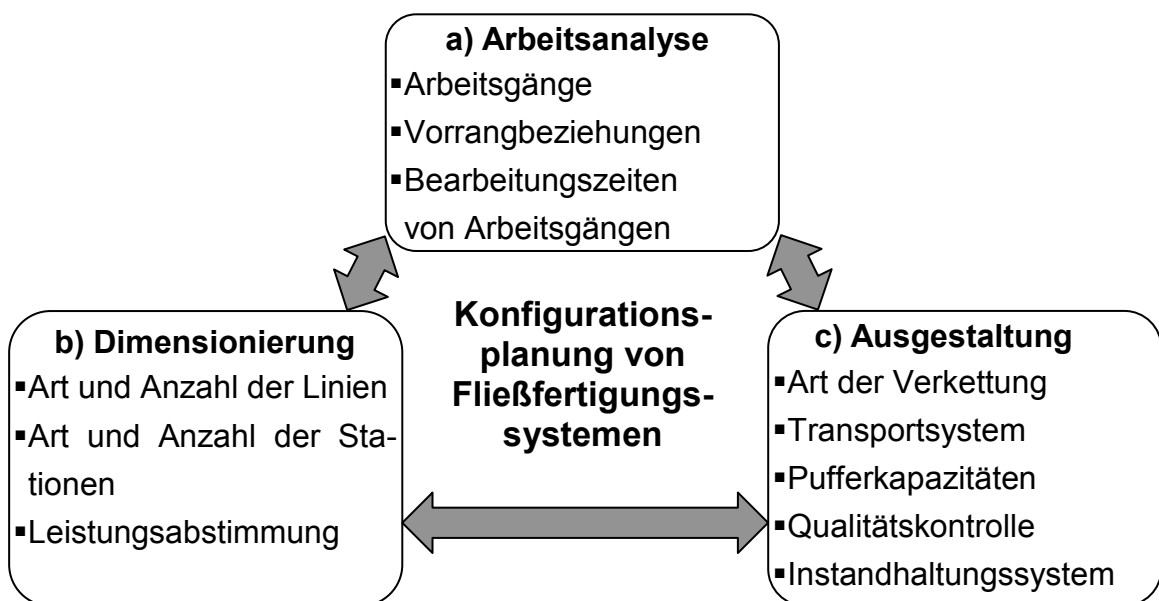


Abb. 3.1: Planungsteilschritte bei der Konfiguration von Fließfertigungssystemen, in Anlehnung an (Kuhn, 1998, S. 8)

Im Zuge der Arbeitsanalyse müssen die einzelnen Arbeitsgänge und ihre Bearbeitungszeiten ermittelt werden. Weiterhin sind die zwischen diesen Arbeitsgängen existierenden technischen Reihenfolgebeziehungen zu beachten. Dementsprechend werden Vorgänger- und Nachfolgerbeziehungen definiert. Die Durchführungszeit eines Arbeitsgangs kann durch zwei Methoden bestimmt werden vgl. (Steffen, 1977, S. 35; REFA, 1978; Zäpfel, 2000, S. 193):

- Zeitaufnahme: Ermittlung von Soll-Bearbeitungszeiten durch Messen
- Verfahren der vorbestimmten Zeiten: mit ihrer Unterstützung können die Soll-Zeiten für individuelle manuelle Arbeitsaufgaben wie bspw. Greifen, Bringen, Fügen oder Loslassen bestimmt werden.

Die Ergebnisse der Arbeitsanalyse lassen sich durch einen sog. Vorranggraph darstellen (vgl. Abb. 2.3).

Während der Dimensionierung eines Fließfertigungssystems sind anhand des angestrebten Durchsatzes sowohl die Anzahl der parallelen Fließlinien als auch die Anzahl der Stationen pro Fließlinie zu planen. Zu diesem Zweck muss zunächst die Taktzeit berechnet werden. Anschließend ist darüber zu entscheiden, welche Arbeitsgänge welchen Stationen zugeordnet werden. Die Zuteilung der Arbeitsgänge auf die Stationen wird in der Fachliteratur als Fließbandabstimmung oder Leistungsabstimmung bezeichnet. Weiterhin ist der Automatisierungsgrad der Stationen auszuwählen. Die Auswahl zwischen automatisierten, teilautomatisierten (hybriden) oder manuellen Arbeitsgängen hängt nicht nur von technisch-wirtschaftlichen Faktoren ab, sondern auch die Arbeitsbedingungen oder Belastung der Mitarbeiter spielen hier eine große Rolle.

Im Zuge der Ausgestaltung sind die nötigen Entscheidungen zur Verwirklichung des Fließsystems zu treffen. Dabei müssen die Auswahl der Verkettungsart, die Bestimmung der Art der Transportmethoden (stetig oder unstetig) bzw. auch die Art und Anzahl der Transporthilfsmittel (Werkstückträger) und die Ermittlung der optimalen Puffergröße vorgenommen werden. Ferner ist eine Strategie für das Qualitätsmanagement zu entwickeln, wobei die Qualitäts- bzw. Nachbearbeitungsstationen im Fließsystem zu integrieren sind.

3.2 Taktzeitberechnung

Die Taktzeit ist eine entscheidende Kenngröße für die Leistungsabstimmung. Die theoretische Taktzeit einer Fließlinie hängt direkt von der zu fertigenden Jahresstückzahl n_j und der für die Taktzeit verfügbaren Arbeitszeit F_T ab. Sind verschiedene Produkte in einer Fließlinie herzustellen, so verkompliziert sich die Berechnung der Linientaktzeit. Für die Ermittlung der Taktzeit sind i.d.R. drei Schritte durchzuführen, vgl. (Witt & Dürr, 2006):

- Berechnung der theoretischen Taktzeit C_T
- Leistungs- oder Fließbandabstimmung: In vielen Fällen resultiert aus Fließbandabstimmung eine neue Taktzeit.
- Korrektur der Taktzeit nach einer Einlaufphase des Fließsystems bzw. des neuen Produkts.

Bei der Ermittlung der theoretischen Taktzeit unterscheidet man zwischen Einprodukt-Fließfertigung, serienweiser Mehrprodukt-Fließfertigung und Variantenfließfertigung¹⁵, vgl. (Witt & Dürr, 2006, S. 416f):

1. Bei Einprodukt-Fließfertigung

$$C_T = \frac{F_T \text{ (Min/Jahr)}}{n_j \text{ (Stück (Stck)/Jahr)}} \text{ (Min/Stck)} \quad (3.1)$$

$$F_T = F_{\text{nom}} - (t_r + t_{\text{er}2} + t_{\text{v}2}) \text{ (Min/Jahr)} \quad (3.2)$$

Dabei lässt sich die nominelle Arbeitszeit F_{nom} wie folgt berechnen:

$$F_{\text{nom}} = AT_j \cdot i_s \cdot t_s \text{ (Min/Jahr)} \quad (3.3)$$

Legende:

t_r : Rüstzeit in Min/Jahr, $t_{\text{er}2}$: Erholzeit außerhalb der Taktzeit in Min/Jahr, $t_{\text{v}2}$: Verteilzeit außerhalb der Taktzeit in Min/Jahr, AT_j : Anzahl der Arbeitstage im Jahr, i_s : Schichtenanzahl je Tag, t_s : Arbeitszeit je Schicht in Min

Zur Verteilzeit gehören die Soll-Zeiten aller Ablaufabschnitte, die in manueller Arbeit zusätzlich zur geplanten Erfüllung eines Ablaufes durch den Mitarbeiter benö-

¹⁵ Bei (Witt & Dürr, 2006) werden die Begriffe konstante Fließreihe, Wechselfließreihe (stetiger und periodischer Stückwechsel) zur Bezeichnung von Fließfertigungsarten benutzt.

tigt werden. Die Erholzeit beinhaltet die Summe der Soll-Zeiten, die bei manueller Arbeit zur Erholung erforderlich sind, vgl. (REFA, 1978, S. 50f). Die Leistungsabstimmung erfolgt nicht mit Hilfe der berechneten theoretischen Taktzeit C_T sondern durch die Grundtaktzeit C_{Tg} . Es gilt:

$$C_{Tg} = \frac{F_{Tg}}{n_j} \text{ (Min/Stck)} \quad (3.4)$$

$$F_{Tg} = F_T - (t_{er1} + t_{v1}) \text{ (Min/Jahr)} \quad (3.5)$$

Legende:

F_{Tg} : verfügbare Zeit für die Grundtaktzeit, t_{er1} : Erholzeit innerhalb der Taktzeit in Min/Jahr, t_{v1} : Verteilzeit innerhalb der Taktzeit in Min/Jahr

2. Bei serienweiser Mehrprodukt-Fließfertigung

Die Ermittlung der Taktzeiten für die Fertigung der jeweiligen Variante erfolgt unter der Bedingung, dass die Stationsanzahl in solchen Fließlinien bei dem Variantenwechsel konstant bleibt. Die Formel (3.6) beschreibt diese Bedingung.

$$M = \frac{(\sum_{j=1}^x t_{gj})_1}{C_{Tg1}} = \frac{(\sum_{j=1}^x t_{gj})_2}{C_{Tg2}} = \dots = \frac{(\sum_{j=1}^x t_{gj})_v}{C_{Tgv}} \quad (3.6)$$

Legende:

1, 2, ..v: Erzeugnisvariante, M: erforderliche Stationsanzahl in der Fließlinie, t_{gj} : Grundzeit¹⁶ für Arbeitsgang j, x: Anzahl der benötigten Arbeitsgänge, C_{Tgv} : Grundtaktzeit des v-ten Erzeugnisses in Min/Stück

3. Bei Variantenfließfertigung

In diesem Fall sind die Bearbeitungszeiten der Stationen so abzustimmen, dass die Taktzeiten vielfältiger Erzeugnisse gleich sind, vgl. (Domschke & Scholl, 1997; Witt & Dürr, 2006). Es gilt:

¹⁶ In den folgenden Abschnitten wird das Symbol d_j für die Bearbeitungszeit eines Arbeitsgangs benutzt.

$$C_{Tg} = \frac{F_{Tg}}{\sum_{v=1}^p n_{jv}} \text{ (Min/Stück)} \quad (3.7)$$

mit p : Anzahl der Erzeugnisvarianten, n_{jv} : Jahresstückzahl aller Varianten v

Treten Ausfallzeiten auf den Stationen auf, weicht demzufolge in vielen Fällen die daraus resultierende Taktzeit von der geplanten Taktzeit ab. Deswegen ist in der Betriebsphase die durchschnittliche Taktzeit je Stunde oder je Schicht zu betrachten, um die gewünschte Ausbringungsmenge exakt zu erreichen. Die Wirkungen von Störungen lassen sich des Weiteren in der Fließlinie durch den sog. Bandwirkungsfaktor¹⁷ berücksichtigen, dessen Wert kleiner als eins ist. Unter Betrachtung der zur Verfügung stehenden Arbeitszeit, der Soll-Mengenleistung und des Bandwirkungsfaktors kann die Soll-Taktzeit wie folgt berechnet werden vgl. (Zäpfel, 2000, S. 197):

$$\text{Soll-Taktzeit} = \frac{\text{Arbeitszeit}}{\text{Soll-Mengenleistung}} \cdot \text{Bandwirkungsfaktor} \quad (3.8)$$

3.3 Fließbandabstimmung

Die Fließbandabstimmung dient i.d.R. dazu die Arbeitsgänge auf den Stationen in einem Fließsystem so zu verteilen, dass die gewünschte Taktzeit erreicht und die Leistungen aller Stationen abgestimmt werden. Darüber hinaus müssen die Reihenfolgebeziehungen zwischen Arbeitsgängen eingehalten werden. Eine detaillierte Darstellung von Fließbandabstimmungsverfahren findet sich in (Domschke & Scholl, 1997; Zäpfel, 2000; Küpper & Helber, 2004; Boysen, 2005).

3.3.1 Zielsetzung der Fließbandabstimmung

Es ist eine Zielsetzung so zu definieren, dass aus der Fließbandabstimmung zulässige Lösungen resultieren. Häufig wird darauf gezielt, die Kosten zu reduzieren bzw. den Bandwirkungsgrad zu maximieren, wobei die Nutzungsgrade zu erhöhen und dadurch die Durchlaufzeit und die Gesamtleerzeiten zu reduzieren sind. Es ist zu beachten, dass einerseits die Maximierung der Stationsanzahl einen positiven

¹⁷ Zur Vereinfachung wird im Folgenden angenommen, dass der Wert des Bandwirkungsfaktors eins ist, solange sein Wert nicht gegeben ist.

Einfluss auf die Produktionsgeschwindigkeit und dadurch auf die durchgesetzte Menge und so mögliche Erlöse, andererseits aber eine negative Wirkung auf die Kosten der Fließlinie hat.

Mit Erhöhung der Stationsanzahl erhöhen sich i.d.R. die erforderlichen Investitionen für die benötigten Flächen, Betriebsmittel und Mitarbeiter. Dabei wird häufig von identischen Lohnkosten für die Mitarbeiter aller Stationen ausgegangen. Demzufolge lässt sich die Zielsetzung in folgende Hauptziele untergliedern: die Minimierung der Stationsanzahl M und/oder der Taktzeit C .

Muss eine Änderung in einer existierten Fließlinie durchgeführt werden, z.B. wegen einer Änderung im herzustellenden Produkt, so wird häufig in der Praxis darauf gezielt, den Bandwirkungsgrad (BG) zu erhöhen. An dieser Stelle wird versucht, die Taktzeit bei gegebener Stationsanzahl zu minimieren.

$$BG = \frac{\sum_{j=1}^x d_j}{M \cdot C} \leq 1 \quad (3.9)$$

3.3.2 Einprodukt-Fließfertigung

Zahlreiche Veröffentlichungen haben das Problem der Abstimmung eines Einprodukt-Fließbandes¹⁸ behandelt. Das einfachste klassische Modell dieser Problemstellung wird als SALBP (engl. Simple Assembly Line Balancing Problems) bezeichnet.

3.3.2.1 Simple Assembly Line Balancing Problems (SALBP)

Das Modell der Fließbandabstimmung SALBP basiert im Allgemeinen auf den folgenden Annahmen¹⁹, vgl. (Baybars, 1986; Scholl A. , 1999, S. 25; Scholl & Becker, 2003):

- Herstellung eines einzelnen Produktes mit vorgegebener Fertigungstechnik
- Jeder Arbeitsgang hat eine deterministische Bearbeitungszeit
- Jede Station S_k kann jeden Arbeitsgang j übernehmen
- Jedem Arbeitsgang darf nur eine Station zugewiesen werden

¹⁸ Der Begriff „Fließband“ wird hierbei verwendet, denn die Weitergabe von Erzeugnissen erfolgt häufig mit kontinuierlicher Beförderung.

¹⁹ Allgemeine Ausnahmen werden nachstehend unter „Zuordnungsrestriktionen“ dargestellt.

- Jeder Station muss mindestens ein Arbeitsgang zugeordnet werden. Das bedeutet, die Stationsanzahl ($1 \leq M \leq x$); x: Anzahl der Arbeitsgänge
- Außer der vorgegebenen Reihenfolgebeziehung zwischen den Arbeitsgängen sind keine Zuordnungsrestriktionen festzustellen
- Fixe Taktzeit für alle Stationen und konstanter Durchsatz
- Serielle Anordnung der Stationen
- Identisch ausgestattete Stationen (bezüglich Personal und Betriebsmittel)
- Unbewegliche Erzeugnisse, d.h., sie werden transportiert
- Die maximale Bearbeitungszeit der Stationen darf die vorgegebene Taktzeit nicht überschreiten. Sie ergibt häufig einen neuen Wert der Taktzeit C.

Obwohl das Modell auf vielen Annahmen basiert, welche meist die reale Situation nicht beschreiben, kann es das Problem der Leistungsabstimmung vereinfachen. Weiterhin können mit Unterstützung von SALBP Informationen über den Erlös und die Stationskosten in der Planungsphase gewonnen werden, vgl. (Domschke & Scholl, 1997, S. 189).

Die Annahme, dass das Fertigungsverfahren des jeweiligen Arbeitsgangs bekannt ist, widerspricht häufig der Tatsache, dass aufgrund der Technik mehrere alternative Fertigungsverfahren zur Ausführung eines Arbeitsgangs vorhanden sein können. Dementsprechend können die Arbeitsgänge in vielen Fällen durch Maschinen und/oder Menschen ausgeführt werden. Demzufolge entstehen unterschiedliche Bearbeitungszeiten und Investitionskosten für einen Arbeitsgang. Das verkompliziert die Berechnung der gesamten Kosten (hinsichtlich Lohn- und Betriebsmittelkosten). Anschließend ist die Bestimmung dieser Kosten allein in Anlehnung an die Stationsanzahl unscharf. Eine Übersicht über die Verfahren und Lösungsansätze für SALBP wird in (Erel & Sarin, 1998; Scholl A. , 1999) dargestellt.

Hinsichtlich der Zielsetzung kann man SALBP in vier alternative Problemstellungen einteilen, vgl. (Domschke & Scholl, 1997, S. 190):

- SALBP-1: Minimierung der Stationsanzahl bei vorgegebener maximaler Taktzeit.
- SALBP-2: Minimierung der Taktzeit bei vorgegebener Stationsanzahl.
- SALBP-E²⁰: Maximierung des Bandwirkungsgrades bei einer gültigen Zuordnung von Arbeitsgängen zu Stationen.

²⁰ (E) ist eine Abkürzung für „efficiency“. Dabei wird der Begriff „Bandwirkungsgrad“ als die deutsche Übersetzung von „line efficiency“ bezeichnet. SALBP-E wurde bei (Domschke & Scholl, 1997) als SALBP-G genannt, wobei (G) Abkürzung für „general“ ist.

- SALBP-F²¹: Bei vorgegebener Stationsanzahl und vorgegebener Taktzeit ist zu prüfen, ob eine zulässige Lösung vorhanden ist.

Dass die betrachteten Annahmen nur selten an einem Fließband anzutreffen sind, erfordert eine Verallgemeinerung des klassischen Modells. Das verallgemeinerte Modell wird als GALBP (engl. general assembly line balancing problems) bezeichnet.

3.3.2.2 General Assembly Line Balancing Problems (GALBP)

Um die Ergebnisse der Leistungsabstimmung zu verbessern, wurden viele praxisnähere Modelle weiterentwickelt, welche die Annahmen von SALBP nicht ganz erfüllen müssen. Dabei werden weitere Strukturalternativen wie z.B. Parallelisierung von Stationen bzw. Arbeitsgängen und U-förmige Strukturen berücksichtigt, vgl. (Sarker & Shanthikumari, 1983; Domschke & Scholl, 1997, S. 233; Becker & Scholl, 2006).

Eine Vernachlässigung der Annahme der linearen Anordnung von Stationen führt in vielen Fällen zu verbesserten Ergebnissen insbesondere im Zusammenhang mit der Leistungsabstimmung und Kostenminimierung. Die Parallelisierung von Stationen und/oder Arbeitsgängen gewinnt an Bedeutung, wenn die Bearbeitungsdauern eines oder mehrerer Arbeitsgänge so lang sind, dass aus der Fließbandabstimmung nach SALBP ein großer Unterschied zwischen Bearbeitungszeiten der Stationen resultiert. Das Hauptziel der Parallelisierung ist es, einen höheren Nutzungsgrad der Stationen zu erreichen. Demgegenüber entstehen zusätzliche Kosten aus Gründen der Einrichtung mehrerer Betriebsmittel und/oder des Wachstums der Anforderung an die Qualifikation der Mitarbeiter. Die Parallelisierung entsteht ebenso, wenn auf beiden Seiten des Fließbands Arbeitsstellen vorgesehen sind. In diesem Fall können die Mitarbeiter ihre Tätigkeiten parallel auf beiden Seiten eines unbeweglichen großen Erzeugnisses erfüllen. Weitere parallele Strukturen wurden im Abs. 2.6.3 dargestellt.

Eine weitere Ausnahme von der linearen Anordnung der Stationen stellt die U-förmige Struktur dar. In diesem Fall können Stationen jeweils zwei unterschiedliche Erzeugnisse, die sich in zwei gegenüberliegenden Bandabschnitten befinden, innerhalb eines Takts bearbeiten. Die Abb. 3.2 zeigt eine U-förmige Anordnung der Stationen.

²¹ (F) ist die Abkürzung von „feasibility“.

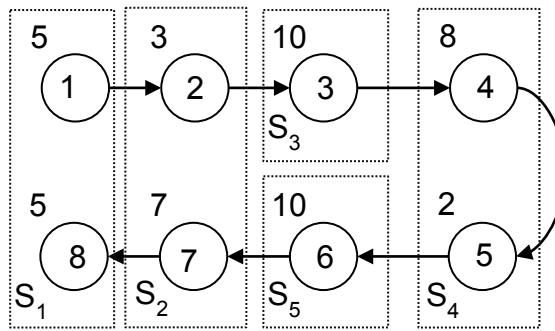


Abb. 3.2: Beispiel für eine U-förmige Struktur, in Anlehnung an z.B. (Boysen, 2005, S. 69)

Im Vergleich zu SALBP kann dabei diese U-Form verbesserte Stationsnutzungsgrade und eine geringe Stationsanzahl gewährleisten. Die auf dem Band transportierten Erzeugnisse werden sowohl am Beginn als auch am Ende des Bandes in den Stationen S_1 und S_2 bearbeitet. Da die Arbeitsstellen der Arbeitsgänge $\{1,8\}$ bzw. $\{2,7\}$ näher zueinander liegen, können die Mitarbeiter der Stationen S_1 bzw. S_2 aufgrund kurzer Wege ihre Tätigkeiten auf beiden Seiten des Bandes durchführen. Die U-förmige Struktur wird z.B. in (Miltentburg, 1998; Balakrishnan, Cheng, Ho, & Yang, 2009; Gökçen, Agpak, Gencer, & Kizilkaya, 2005) untersucht und wird nachstehend von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen.

3.3.2.3 Näherungsverfahren

Die Einhaltung der Reihenfolge (Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen des Vorranggraphen) kann i.d.R. zu unterschiedlichen Verteilungen der Arbeitsgänge auf die Stationen führen. Je mehr Arbeitsgänge in einem Vorranggraphen existieren, desto mehr gültige Lösungen ergeben sich zum Problem der Leistungsabstimmung. Um eine einzige optimierte Lösung zu finden, ist es erforderlich, entweder die zulässigen Lösungen zu bewerten, oder weitere Prioritätsregeln zu definieren, welche die Auswahl bzw. die Verteilung der Arbeitsgänge auf die Stationen kontrollieren. Dementsprechend wurden zahlreiche exakte und heuristische Lösungsansätze entwickelt. Die Lösungen nach exakten Verfahren beruhen auf dem Entwurf komplexer Algorithmen, deren Rechenaufwand²² sich exponentiell mit der Steigerung der Anzahl der Arbeitsgänge erhöht, vgl. (Zäpfel, 2000, S. 201). Aufgrund ihrer hohen Rechenaufwände werden sie dabei nicht mehr betrachtet. Demgegenüber gewinnen die Näherungsverfahren für praktische Lösungen mehr an Bedeutung. Es ist jedoch zu beachten, dass die aus Näherungsverfahren resultierenden Ergebnisse nicht unbedingt die optimalen Lösungen sind. Ein grober

²² Dies mag sich mit fortschreitender Rechentechnik ändern, zumindest für Systeme mit einer überschaubaren Anzahl von Arbeitsgängen.

Beispiele für die Prioritätsregeln sind der Rangwert, das Positionsgewicht, die abnehmende Zahl direkter Nachfolger (N_j), die abnehmende Zahl direkter und indirekter Nachfolger N_j^a von Arbeitsgang j und abnehmende Bearbeitungszeiten von Arbeitsgängen. In der Tab. 3.1 werden diese erwähnten Prioritätsregeln definiert.

Tab. 3.1: Beispiele für Prioritätsregeln zur Fließbandabstimmung²³

Prioritätsregel	Berechnung
abnehmende Bearbeitungszeit	$P_j = d_j$
abnehmende Zahl direkter Nachfolger	$P_j = N_j $
abnehmende Zahl aller Nachfolger	$P_j = N_j^a $
Rangwert	$P_j = d_j + \sum_{h \in N_j} P_h$
Positionswert	$P_j = d_j + \sum_{h \in N_j^a} d_h$

Beispiel A²⁴

Man betrachtet den in Abb. 3.4 dargestellten Vorranggraphen. Die Taktzeit $C = 11$ ZE ist vorgegeben. Es wird angestrebt, eine minimale Stationsanzahl zu erreichen. Mit Unterstützung der ersten Prioritätsregel in Tab. 3.1 werden die Arbeitsgänge nach abnehmender Bearbeitungszeit (höchstem Prioritätswert) wie folgt sortiert: 11, 2, 8, 1, 4, (3 oder 5), (7 oder 9), 6, (10 oder 12). Die einzelnen Schritte des Verfahrensablaufs werden in der Tab. 3.2 dargestellt.

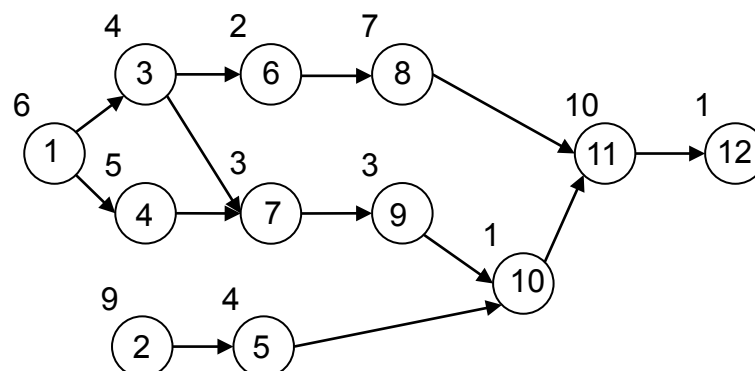


Abb. 3.4: Vorranggraph des Beispiels A, in Anlehnung an (Domschke & Scholl, 1997, S. 181)

²³ Weitere Beispiele für diese Prioritätsregeln finden sich bei (Domschke & Scholl, 1997, S. 198; Zäpfel, 2000, S. 210; Küpper & Helber, 2004, S. 152; Boysen, 2005, S. 84).

²⁴ Die Beispiele A und B wurden in Anlehnung an die Überlegungen von (Domschke & Scholl, 1997) entwickelt.

Tab. 3.2: Eine zulässige Lösung für das Beispiel A

Station	Schritt- nummer	einplan- bar	Arbeits- gang	d_j (ZE)	noch ver- fügbare Zeit (ZE)	Bele- gungszeit (ZE)	Verlust- zeit (ZE)
Station S_1	1	1, 2	2	9	3	9	3
Station S_2	2	1, 5	1	6	5	11	0
	3	3, 4, 5	4	5	0		
Station S_3	4	3, 5, 7	3	4	7	11	0
	5	5, 6, 7	5	4	3		
	6	6, 7	7	3	0		
Station S_4	7	6, 9	9	3	8	6	5
	8	6, 10	6	2	6		
	9	10	10	1	5		
Station S_5	10	8	8	7	4	7	4
Station S_6	11	11	11	10	1	11	0
	12	12	12	1	0		

Im ersten Schritt sind nur die Arbeitsgänge 1 und 2 einplanbar. Man öffnet die Station S_1 und ordnet ihr den Arbeitsgang 2 zu. Anschließend sind die Arbeitsgänge 1 und 5 verfügbar, aber nicht einplanbar, da die noch verfügbare Zeit (3 ZE) kleiner als die Bearbeitungszeiten des Arbeitsgangs 1 und auch 5 ist. Da im Schritt vier die Arbeitsgänge 3 und 5 den gleichen Prioritätswert haben, lässt sich z.B. die Prioritätsregel ($P_j = |N_j^a|$) als Tie-Break-Regel verwendet. Demzufolge ergibt sich die Belegung $S_1 = \{2\}$, $S_2 = \{1, 4\}$, $S_3 = \{3, 5, 7\}$, $S_4 = \{9, 6, 10\}$, $S_5 = \{8\}$, $S_6 = \{11, 12\}$ mit $M = 6$ Stationen.

3.3.3 Mehrprodukt-Fließfertigung

Die erwähnten Verfahren in den letzten Abschnitten beschäftigten sich mit der Abstimmung von Fließlinien, die nur Einzelprodukte fertigen können. In der Praxis gewinnt aber die Gestaltung von Mehrprodukt-Fließsystemen immer mehr an Bedeutung. In vielen Fällen besitzen diese Varianten dasselbe Basiserzeugnis. In diesem Fall ist es wirtschaftlich unmöglich, jede Variante auf einer einzelnen Fließlinie herzustellen. Es ist außerdem unwirtschaftlich, die Arbeitsgänge, die an der Bearbeitung aller Varianten beteiligt sind, verschiedenen Stationen zuzuweisen. Es würden vor allem zusätzliche Kosten für die Installation mehrerer gleicher Betriebsmittel entstehen. Deshalb wird im Allgemeinen immer versucht, die zur

Bearbeitung unterschiedlicher Varianten gleichen Arbeitsgänge einer einzelnen Station in der Mehrprodukt-Fließlinie zuzuordnen.

Die Ausführungsdauern gleicher Arbeitsgänge zur Bearbeitung unterschiedlicher Varianten sind i.d.R. nicht gleich. Aus diesem Grund wird in der Praxis darauf gezielt, eine Fließbandabstimmung für diese Varianten so durchzuführen, dass sich möglichst keine großen Kapazitätsunterschiede ergeben. Um Varianten ($p = 1, 2, \dots, v$) mit unterschiedlichen Vorranggraphen, aber ähnlich, auf einer Fließlinie zu fertigen, muss zuerst ein gemeinsamer Vorranggraph (Mischgraph) für alle Varianten erzeugt werden. Dieser Mischgraph resultiert aus der Vereinigung aller Arbeitsgänge und Beziehungen der ursprünglichen Vorranggraphen, vgl. Abb. 3.5. An dieser Stelle muss beachtet werden, dass die Beziehungen zwischen den Arbeitsgängen in dem Mischgraph keine Zyklen bilden, da ansonsten keine klare serielle Reihenfolge gebildet werden kann, vgl. (Ahmadi & Wurgaft, 1994; Boysen, 2005, S. 139). Bei der Bestimmung der Arbeitsgänge im Mischgraph muss berücksichtigt werden, dass alle gleichen Arbeitsgänge (gleiche Knotennummer) der unterschiedlichen Vorranggraphen nur durch einen Arbeitsgang im Mischgraph ersetzt werden. Wenn ein Arbeitsgang nicht an allen Varianten durchgeführt wird, lässt sich dieser mit einer Bearbeitungsdauer von Null versehen. Der Hauptschritt bei der Erzeugung von Mischgraphen ist die Berechnung der Ausführungsdauern von Arbeitsgängen im Mischgraph. Ist die Produktionsmenge b_v einer einzelnen Varianten in einem bestimmten Planungszeitraum T vorgegeben, so berechnet man zuerst den Anteil q_v jeder Variante v . Wird die Bearbeitungszeit von Arbeitsgang j der Variante v als (d_{jv}) bezeichnet, so wird die mittlere Bearbeitungszeit d_j des Arbeitsganges j im Mischgraph durch die Formel (3.10) berechnet, vgl. (Domschke & Scholl, 1997, S. 252).

$$d_j = \sum_{v=1}^p q_v \cdot d_{jv} = \frac{\sum_{v=1}^p b_v \cdot d_{jv}}{\sum_{v=1}^p b_v} \quad (3.10)$$

Anschließend lässt sich die Taktzeit der Linie durch die Formel (3.11) berechnen:

$$C = \frac{T}{b} = \frac{T}{\sum_{v=1}^p b_v} \quad (3.11)$$

Auf Grundlage der Taktzeit C und des erzeugten Mischgraphen und mithilfe einer Prioritätsregel kann die Fließbandabstimmung durchgeführt werden.

Beispiel B

Eine Fließlinie zur Herstellung von drei Varianten ist zu konfigurieren. Die gewünschte Ausbringungsmenge der einzelnen Varianten im Planungszeitraum von $T = 77$ ZE sind $b_1 = 4$, $b_2 = 2$, $b_3 = 1$. Die Abb. 3.5 zeigt die einzelnen Vorranggraphen der Varianten bzw. den Mischgraphen.

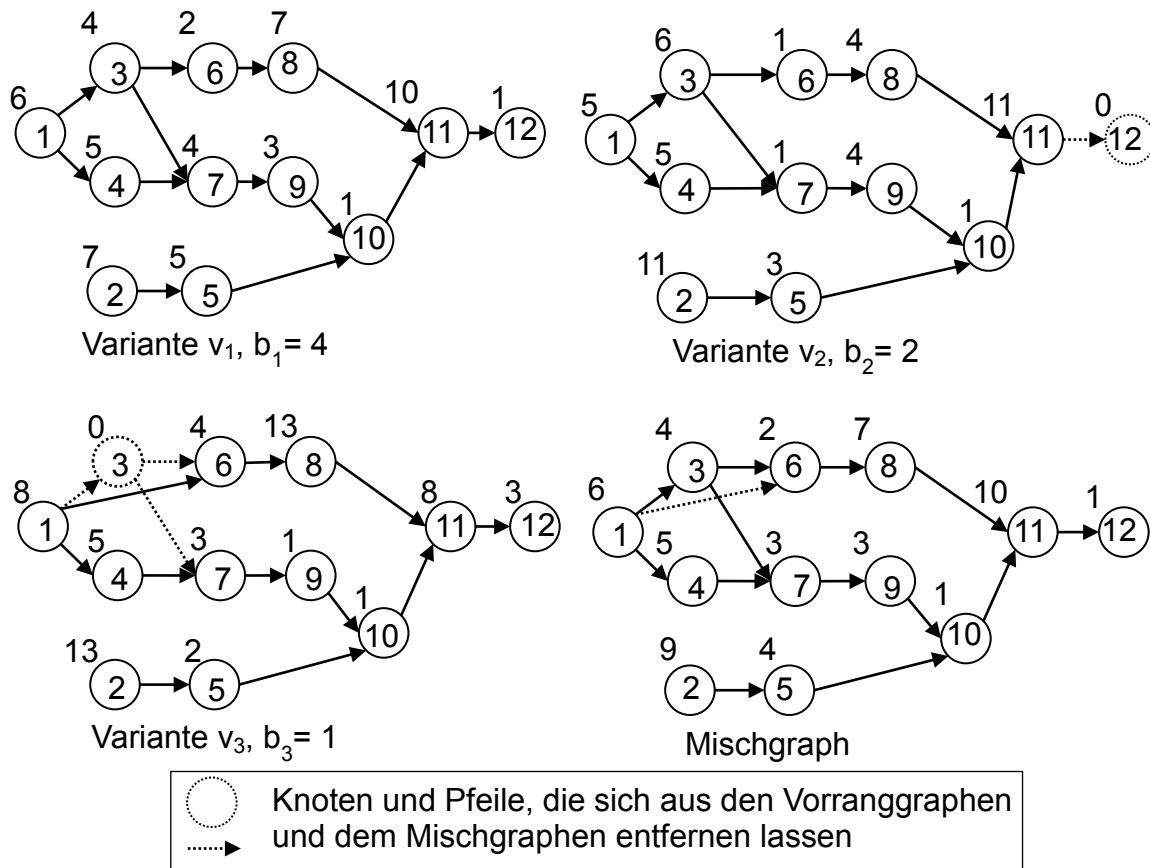


Abb. 3.5: Erzeugung des Mischgraphen für das Beispiel B, in Anlehnung an (Domschke & Scholl, 1997, S. 252)

Die Taktzeit beträgt 11 ZE. Die Lösung für das Beispiel wird im Beispiel A dargestellt: $S_1 = \{2\}$, $S_2 = \{1, 4\}$, $S_3 = \{3, 5, 7\}$, $S_4 = \{9, 6, 10\}$, $S_5 = \{8\}$, $S_6 = \{11, 12\}$. Um die Stationsbearbeitungszeiten²⁵ zu untersuchen bzw. Überlastungen zu bestimmen, ist es sinnvoll, die folgenden Größen T_{kv} , T_v , $t(S_k)$ zu definieren, vgl. (Domschke & Scholl, 1997, S. 253):

$$T_{kv} = \sum_{j=1}^x d_{jv} \cdot x_{jk} \quad (3.12)$$

²⁵ In (Domschke & Scholl, 1997) wurde dabei der Begriff „Belegungszeit“ anstatt „Bearbeitungszeit“ benutzt. Da es sich hier um starre Verkettung von Stationen mit unterschiedlichen Bearbeitungszeiten handelt, besteht die Belegungszeit aus Bearbeitungszeit und Blockierzeit.

$$T_v = \sum_{j=1}^x d_{jv}/M \quad (3.13)$$

$$t(S_k) = \left(\sum_{v=1}^p b_v \cdot T_{kv} \right) / b \quad (3.14)$$

Legende

T_{kv} : Bearbeitungszeit der Station k durch Variante v pro ME, x_{jk} : Binärvariable bezeichnet die Zuweisung von Arbeitsgang j zu Station k , T_v : durchschnittliche Bearbeitungszeit der M Stationen durch 1 ME von Variante v , $t(S_k)$: mittlere Bearbeitungszeit der Station k pro ME

Gemäß den oben vorgestellten Formeln ergeben sich die Bearbeitungszeiten der Stationen in Tab. 3.3.

Tab. 3.3: Überblick über die Stationsbearbeitungszeiten pro Takt je Variante in ZE

$S_k \backslash T_{kv}$	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	T_v
T_{k1}	7	11	13	6	7	11	9,17
T_{k2}	11	10	10	6	4	11	8,67
T_{k3}	13	13	5	6	13	11	10,17
$t(S_k)$	9	11	11	6	7	11	

Es wird ersichtlich, dass die Bearbeitungszeiten der Stationen S_4 und S_5 (bei $v=1$ und 2) sehr niedrig im Vergleich mit den anderen Stationen sind, d.h. große Leerzeiten treten in diesen Stationen auf. Weiterhin zeigt Tab. 3.3 starke Schwankungen der Bearbeitungszeiten von Stationen, die zur Erhöhung der gesamten Durchlaufzeit führen. Gründe für diese Schwankungen sind dabei grundsätzlich die Unterschiede zwischen den Bearbeitungsdauern unterschiedlicher Varianten durch die einzelnen Arbeitsgänge und die Unterschiede zwischen der Anzahl erforderlicher Arbeitsgänge zur Bearbeitung einzelner Varianten. Taktzeitüberschreitungen entstehen sowohl in der Station S_3 während der Bearbeitung der Variante v_1 als auch in den Stationen S_1 , S_2 und S_5 während der Ausführung der Variante v_3 . Diese Taktzeitüberschreitungen können i.d.R. Arbeitsüberlastungen des Fertigungssystems und dadurch Verspätungen fertiger Produkte verursachen. Ist die Arbeitsüberlastung nicht vermeidbar, so werden in der Praxis bei manuellen

Stationen zusätzliche hoch qualifizierte Mitarbeiter (Springer) eingestellt, deren Aufgabe darin besteht, die Produktionsgeschwindigkeit an den betroffenen Stationen kurzfristig zu beschleunigen.

Abhängig von ihren Ursachen lassen sich die Taktzeitüberschreitungen grundsätzlich wie folgt klassifizieren, vgl. (Domschke, Klein, & Armin, 1996):

- **Arbeitsgangbedingt:** Wenn die Bearbeitungszeit T_{jv} eines Arbeitsgangs j die Taktzeit C überschreitet, lässt dies eine Überschreitung der Taktzeit in Höhe von mindestens $(T_{jv} - C)$ entstehen. Beispiel dafür ist die Bearbeitung der Variante v_3 in den Stationen S_1 und S_5 .
- **Variantenbedingt:** Die Gesamtbearbeitungszeit $\sum_{j=1}^x d_{jv}$ einer Variante ist größer als der Wert $(M \cdot C)$.
- **Zuordnungsbedingt:** Die Taktzeitüberschreitungen treten auf, wenn mehrere Arbeitsgänge einer Station zugeordnet werden. Beispiel dafür ist die Bearbeitung der Variante v_3 und v_1 in den Stationen S_2 bzw. S_3 .

Die arbeitsgangbedingten Taktzeitüberschreitungen lassen sich nicht vermeiden, ohne die entsprechenden Arbeitsgänge oder Stationen zu parallelisieren. Zwar führt diese Parallelisierung während der Bearbeitung der Variante v_3 zur Vermeidung der Blockierzeit, jedoch erhöhen sich die Leerzeiten bei der Bearbeitung der Varianten v_1 und v_2 . Weiterhin steigt die Schwankung der Stationszeiten (vgl. Variante v_1 und v_2 in der Station S_5). Die variantenbedingte Taktzeitüberschreitung vermeidet man durch die Erhöhung der Stationsanzahl oder der Taktzeit.

Es wurden viele Methoden entwickelt, um zuordnungsbedingte Taktzeitüberschreitungen zu beheben. Dabei versucht man, die Abweichung zwischen sich ergebenden und mittleren Bearbeitungszeiten der Variante zu vermindern. Um diese Zielsetzung zu erreichen, wurden in der Literatur sowohl zeitorientierte als auch kostenorientierte Zielfunktionen definiert. Die kostenorientierte Zielsetzung wurde in (Chakravarty, 1985) betrachtet, wobei Algorithmen zur Bestimmung der Stationsanzahl unter Beachtung der Fertigungskosten, Lohnkosten, Kapitalbindung und Umstellungskosten entwickelt wurden. Die häufig in der Fachliteratur behandelten zeitorientierten Zielfunktionen sind wie folgt zusammengefasst, vgl. (Thomopoulos, 1970; Decker, 1993; Domschke & Scholl, 1997).

$$\text{Minimiere } Z_1 = \sum_{k=1}^M \sum_{v=1}^P b_v \cdot |T_{kv} - T_v| \quad (3.15)$$

$$\text{Minimiere } Z_2 = \sum_{k=1}^M \sum_{v=1}^P |T_{kv} - T_v| \quad (3.16)$$

$$\text{Minimiere } Z_3 = \max\{|T_{kv} - T_v| \text{ für } k = 1, \dots, M \text{ und } v = 1, \dots, P\} \quad (3.17)$$

$$\text{Minimiere } Z_4 = \sum_{k=1}^m \sum_{v=1}^P \max\{0, T_{kv} - C\} \quad (3.18)$$

Die Reduzierung des Unterschiedes zwischen den Bearbeitungszeiten von Stationen nach diesen Zielfunktionen erfolgt heuristisch oder nach einem exakten Verfahren und ist häufig mit erheblichem Aufwand verbunden. Im Folgenden wird eine optimierte Lösung für das Beispiel nach der Zielfunktion Z_4 dargestellt.

Diese Lösung ist: $S_1 = \{2\}$, $S_2 = \{1,5\}$, $S_3 = \{3,4\}$, $S_4 = \{6,7,9,10\}$, $S_5 = \{8\}$, $S_6 = \{11,12\}$. Die Bearbeitungszeitwerte stellen die Tab. 3.4 und Abb. 3.6 dar. Das in Abb. 3.6 angezeigte Belastungsdiagramm²⁶ stellt anschaulich die Schwankung der Stationszeiten T_{kv} bei der Bearbeitung einzelner Varianten dar.

Tab. 3.4: Überblick über die Stationsbearbeitungszeiten für die Zielfunktion Z_4 , in Anlehnung an (Domschke, Klein, & Armin, 1996)

$S_k \backslash T_{kv}$	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	T_v
T_{k1}	7	11	9	10	7	11	9,17
T_{k2}	11	8	11	7	4	11	8,67
T_{k3}	13	10	5	9	13	11	10,17
$T(S_k)$	9	10	9	9	7	11	

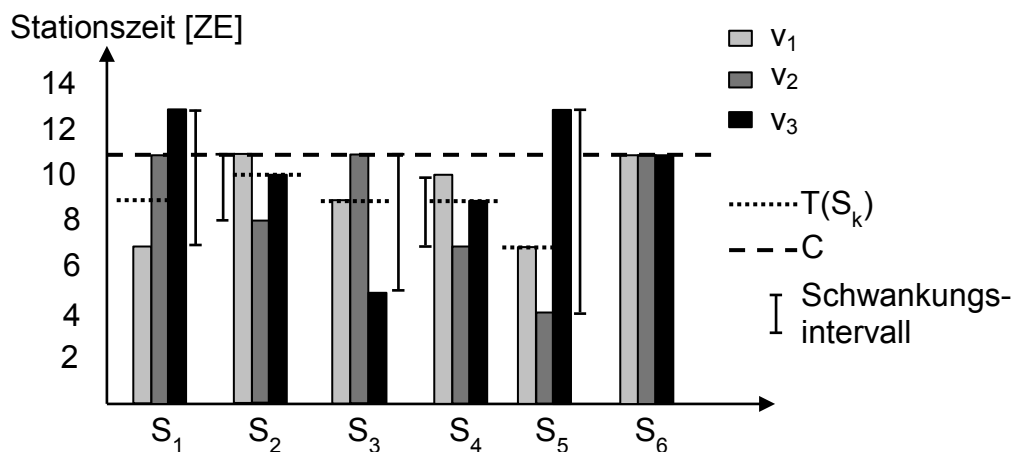


Abb. 3.6: Belastungsdiagramm für die Zielfunktion Z_4

²⁶ In diesem Sinne sind die Begriffe „Belastung“ und „Auslastung“ synonym. Die Auslastung einer Station wird nach (Jusić, 2003, S. 14) zum Ausdrücken des Bearbeitungszeitanteils benutzt, d.h. in dem die Station nicht gestört ist, hungert oder blockiert ist.

3.3.4 Zuordnungsrestriktionen

Die Vorrangbeziehungen zwischen Arbeitsgängen sind nicht die einzigen Restriktionen für die Stationszuordnung in einer Fließlinie, sondern Restriktionen können aus verschiedenen Gründen entstehen, vgl. (Scholl A. , 1999, S. 12; Zäpfel, 2000, S. 196; Boysen, 2005, S. 72):

- Mindestens zwei Arbeitsgänge dürfen nicht einer und derselben Station zugewiesen werden. Ein Beispiel für solche Arbeitsgänge sind Bohr- und Messtätigkeiten. Im Gegensatz müssen, z.B. aus wirtschaftlichen Gründen, zwei oder mehrere Arbeitsgänge in einer Station bearbeitet werden.
- Ein Arbeitsgang muss einer Station zugeordnet werden oder im umgekehrten Fall darf in einer Station nicht ausgeführt werden. Diese Fälle treten meist aus Raumgründen auf, so dass ein Arbeitsgang nur an einem Ort platziert werden kann.
- Aus physischen und psychischen Gründen kann es angebracht sein, einen Arbeitsgang automatisiert, statt manuell, auszuführen. In diesem Zusammenhang sollte ein manueller Arbeitsgang nicht zwischen zwei automatisierten Stationen geplant werden.

3.4 Dimensionierung von Puffern

Zur Auslegung der Puffer in einem Fließsystem sind i.d.R. Zahl und Kapazität, und Lokalisierung der Puffer zu bestimmen vgl. (Hansmann, 1984; Hoitsch, 1993). Das Hauptproblem liegt bei der Ermittlung von Pufferkapazitäten, da im Prinzip Wahrscheinlichkeitsverteilungen über Stör-, Betriebs- und Belegungsdauer beachtet werden müssen. Für dieses Ziel bietet die Fachliteratur zwei Methoden an; die analytische Methode und die Simulation, die in Abs. 4.2 dargestellt werden.

Um optimierte Pufferkapazitäten in einer Fließfertigung zu ermitteln sind verschiedene Maßstäbe anzusetzen, die in technologische und wirtschaftliche Kriterien gegliedert werden können. Unter den technologischen Kriterien werden die Pufferwirksamkeiten auf das System, bzw. die Zielkenngrößen berücksichtigt. Das Hauptziel der Hinzufügung von Puffern ist grundsätzlich die Reduzierung von Stillstandzeiten. Außerdem wirkt sich die Reduzierung der Durchlaufzeit positiv auf die Erhöhung des Durchsatzes aus. Die Wirkung der Puffer ist abhängig von der Größe der Pufferkapazitäten. Dabei ist jedoch darauf zu achten, dass die Steigerung der Puffergröße nicht unbegrenzt zur Verbesserung führt, vgl. (Buzacott, 1967; Dallery & Gershwin, 1992). Bei manuellen und hybriden Fließlinien ist die

Dimensionierung von Ausgleichpuffern von zwei entscheidenden Faktoren abhängig:

- Erwartungswert der Bearbeitungszeit
- Varianz bzw. Variationskoeffizient der Bearbeitungszeit

Bei automatisierten Fließlinien sind der Wert bzw. die Verteilung der Stördauer für die Dimensionierung von Störungspuffern entscheidend.

Unter den wirtschaftlichen Kriterien werden die Puffer- bzw. Lagerkosten berücksichtigt. Diese lassen sich in direkte und indirekte Kosten untergliedern. Direkte Kosten umfassen alle Kosten, die durch die Puffer entstehen. Diese beinhalten Anschaffungskosten, Betriebskosten (Bedienung, Wartung, Instandhaltung), Flächenbedarf der Puffereinrichtungen etc. Indirekte Kosten umfassen alle Kosten, die sich aus der Pufferung von Erzeugnissen bzw. Produkten ergeben (Kapitalbindung).

Es wird in der Literatur empfohlen, die Puffergröße so zu bestimmen, dass die Summe aus Puffer- und Systemstillstandskosten minimal ist, vgl. Abb. 3.7. Dabei wird angenommen, dass die Wirtschaftlichkeit des Fertigungssystems von den Systemstillstands-, und Puffer- bzw. Lagerkosten abhängig ist. Für die praktische Anwendung müsste dann die Nebenbedingung gelten, dass der geforderte Durchsatz mit dieser Puffergröße erreicht oder überschritten wird.

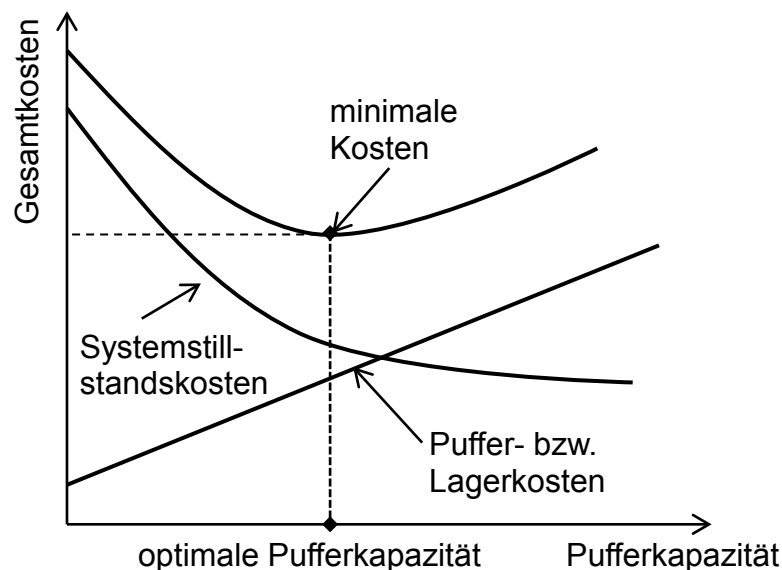


Abb. 3.7: Ermittlung optimaler Pufferkapazität, in Anlehnung an (Basu, 1977)

3.5 Planung der Nacharbeit

In Abs. 2.6.2 wird eine allgemeine Struktur von Nachbearbeitungsschleifen beschrieben. Im Folgenden werden weiterhin die in der Fachliteratur behandelten Vorgehensweisen für die Integration von Qualitätsstationen in Fließsysteme erläutert. In (Kropik, 2009) wird zwischen zwei Verfahren zur Durchführung der Nacharbeit unterschieden. Wird eine Qualitätsstation am Ende der Linie hinzugefügt, so werden die auf dieser Linie gefertigten Produkte geprüft. Die Qualitätsstation überprüft diese Produkte und gliedert sie normalerweise in drei Kategorien:

- Fehlerfreie Produkte
- Fehlerhafte Produkte müssen zur Nacharbeit weitergeleitet werden
- Ausschuss muss aus dem System entfernt werden.

Aufgrund der eventuellen Vielfalt der entstehenden Fehler und der möglichen Anordnung von Stationen in der Nacharbeit lässt sich deshalb die Reihenfolge der Erzeugnisse nicht beeinflussen. Nachdem die Nachbearbeitungsvorgänge in der Nebenlinie durchgeführt werden, werden diese Erzeugnisse erneut in den üblichen Fertigungsablauf eingeschleust. Solche Schleifenstrukturen wurden in der Literatur mit den Zielen untersucht, den Materialfluss zu steuern (Reihenfolgeplanung), vgl. (Wilhelm, 1979), oder Puffergrößen zwischen den Stationen zu ermitteln, vgl. (Helber, 1999; Hellmich, 2003).

Erfolgt eine umfangreiche Prüfung bzw. Nacharbeit in der Linie, so liefert die Linie nur fehlerfreie Produkte aus. Dabei werden Fehler möglichst sofort entdeckt und behoben. Einerseits spielt die Behebung von Fehlern am Fehlerort eine große Rolle zur Reduzierung von Fehlerwirkungen auf die Fertigungssequenz. Andererseits ist das aufgrund der mehrfachen Anzahl von Prüf- bzw. Nachbearbeitungsstellen mit hohen Kosten verbunden. Aus diesen Gründen kann in der Praxis eine Kombination beider Verfahren angetroffen werden. Die Durchführung der Nachbearbeitungsprozesse auf den Stationen in der Linie kann zur Erhöhung der Aufenthaltszeit des Erzeugnisses auf den Stationen und dadurch zur Erhöhung der Taktzeit der Linie und somit zu Zeitverlusten führen. Dann kann die ursprüngliche Abstimmung der Taktzeiten der Stationen nicht mehr gehalten werden. Nachbearbeitungsstationen sind in Hauptfließlinien zu integrieren, je höher die Variantenvielfalt und außerdem je höher die Anforderung ist, die Regeln der JIT oder JIS (Just In Sequence) Konzepte einzuhalten, vgl. (Kropik, 2009, S. 318).

Eine besondere Strategie zur Verbesserung der Produktqualität in der flexiblen Fertigung, die aber in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet wird, stellt die Montagetechnologie „Adaptive und Selektive Montage“ (ASM) dar. Das Prinzip der ASM basiert grundsätzlich auf der Erfassung von Qualitätsdaten und das adaptive Reagieren im Montageprozess, so dass anschließend „Null-Fehler“-Produktion mit geringen Qualitätskosten angestrebt wird. Dabei sind die gefertigten oder zuge-lieferten Erzeugnisse zu vermessen und Toleranzgruppen festzulegen. Nur die Erzeugnisse, die geeignete Toleranzgruppengrenzen aufweisen, dürfen miteinander montiert werden. Dadurch lassen sich hierbei geringe Nacharbeit und reduzierter Ausschuss erreichen, wohingegen die Durchlaufzeit ansteigen kann. Die Montagestruktur zeigt hierbei i.d.R. eine Schleife auf, die von der oben dargestellten Nachbearbeitungsschleife zu unterscheiden ist. Im Gegensatz zu ASM müssen alle fehlerhaften Erzeugnisse in der Nachbearbeitungsschleife nachbearbeitet werden. Ein Überblick über das Prinzip der ASM wird in (Zocher, 2002) gegeben.

3.6 Instandhaltung

Die Instandhaltung zielt darauf ab, durch geeignete Maßnahmen die Funktions- und Leistungsfähigkeit einer Betrachtungseinheit, oder nur Einheit genannt, zu erhalten, wiederherzustellen oder zu verbessern. Unter Einheiten lassen sich alle Betriebsmittel, Stationen oder Systeme definieren, vgl. (DIN31051, 2012). Die Hauptprozesse der Instandhaltung können durch vier Grundmaßnahmen charakterisiert werden, die in Abb. 3.8 dargestellt werden, vgl. (DIN31051, 2012; Weißenbach, 2012).

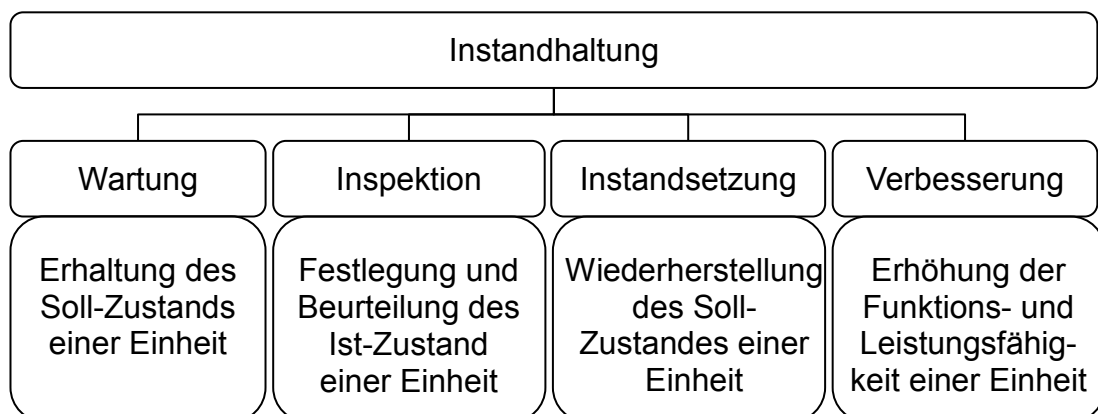


Abb. 3.8: Charakterisierung der Instandhaltung, in Anlehnung an (DIN31051, 2012)

Hervorzuheben sind dabei die Instandsetzungsaktivitäten. Sie können einerseits vorbeugend (geplant) durchgeführt werden. Beispiel dafür ist der Tausch eines Bauelements, ohne dass momentan ein Stationsausfall vorliegt. Andererseits sind reaktive Instandsetzungen notwendig bei der Entstehung von Störungen.

Es ist bei automatisierten Fließsystemen zwischen zentralisierten und dezentralisierten Instandhaltungssystemen zu unterscheiden, vgl. (Kuhn & Tempelmeier, 1997, S. 10). Bei zentralisierten Systemen werden Mitarbeiter einer Instandhaltungsabteilung zur Bekämpfung technischer Schwachstellen eingesetzt, die meist keinen unmittelbaren Einfluss auf den Durchsatz des Fließsystems haben. Die kontinuierliche Beobachtung des Fließsystems mit dem Ziel der Behebung von Störungen kennzeichnet eine wesentliche Aufgabe dieser Mitarbeiter. Solche Tätigkeiten sind jedoch nicht motivierend und sie können sich negativ auf die Häufung und/oder Dauer von Störungen auswirken, vgl. (Krüger T. , 2000, S. 4f). Weiterhin entsteht bei zentralisierten Systemen ein erheblicher Aufwand für die Meldung zahlreicher Störungen und die Beschreibung der Ereignisse durch die in den Stationen tätigen Mitarbeiter an die Instandhaltungsabteilung.

Aufgrund der zunehmenden Komplexität von Montagesystemen, bspw. bei hybriden Fließsystemen, nimmt die Tendenz zur Dezentralisierung von Instandhaltungsaufgaben zu. Zusätzlich zu ihren Bearbeitungsaufgaben müssen die Mitarbeiter die Wartungs- und Instandsetzungsaufgaben in ihren Stationen erfüllen. So können sich niedrigere Kosten für das Instandhaltungspersonal und gleichzeitig geringere Stör- bzw. Reparaturzeiten ergeben. Im Gegenzug erhöht sich die Anforderung an die Qualifikation der Mitarbeiter. Desweiteren kann in diesem Zusammenhang Mangel an Personalkapazität zur Reduzierung des Nutzungsgrades führen.

Die traditionellen Planungsprobleme der Instandhaltung in der Fließfertigung wurden in (Kuhn, 1998, S. 16) in Instandhaltungsprogramm-, Bereitstellungs-, und Instandhaltungsablaufplanung gegliedert bzw. erläutert. Auf weitere Behandlung dieser Probleme wird im Folgenden verzichtet. Der Fokus wird auf die Fristigkeit der Störungen gelegt. In Abhängigkeit vom erforderlichen technischen Aufwand lassen sich die Instandsetzungsaktivitäten in langfristige und kurzfristige Instandsetzungen (Reparaturen bzw. Entstörungen) unterteilen. Bei den hybriden und vor allem automatisierten Fließlinien hat die Stördauer einen wesentlichen Einfluss auf die Stationsverfügbarkeiten und dadurch auf den Nutzungsgrad der Linie (vgl. Abs. 4.1.3).

3.7 Zusammenfassung Kapitel 3

Das Basisproblem bei der Konfiguration von Fließsystemen stellt die Fließbandabstimmung dar. Die entwickelten Fließbandabstimmungsverfahren konzentrieren sich hauptsächlich auf die serielle Struktur und selten auf die parallele Struktur, ohne die Zuordnungsrestriktionen dabei zu beachten. Ist eine Zuordnungsrestriktion zu berücksichtigen, so wird die Abstimmung von Stationsleistungen schwieriger. Demzufolge ist die Wahrscheinlichkeit höher, dass ein Engpass entsteht, der einen großen Einfluss auf die Linien- bzw. Fließsystemleistung hat.

Im Rahmen der Fließbandabstimmung wurde sich grundsätzlich auf den Unterschied zwischen den Bearbeitungszeiten der zu fertigenden Varianten konzentriert. Die daraus entstehenden Bearbeitungszeitschwankungen können mithilfe von Zielfunktionen reduziert werden. In diesem Zusammenhang wurde eine optimierte Lösung für das Beispiel B nach der Zielfunktion Z_4 erläutert. Diese Schwankungsart der Bearbeitungszeiten lässt sich unter „interne Einflussgrößen“ einordnen. Weitere Arten von Bearbeitungsschwankungen ergeben sich wegen der stochastischen Prozesse, die abhängig von der Entscheidung über manuelle oder automatisierte Arbeitsgänge entstehen. Negative Wirkungen dieser Prozesse können durch die Optimierung von Puffergrößen und Instandhaltungsaktivitäten bewältigt werden. Unter Berücksichtigung dieser internen sowie auch externen (z.B. Nachfrageschwankungen) Einflussgrößen wird das Beispiel B in Kapitel 6 und 7 weiter untersucht.

Bei der Nacharbeitsplanung wurde vor allem die Integration der Qualitätskontrolle in der Fließlinie dargestellt und die daraus resultierenden Zeitverluste dargestellt. Die Auslegung der Nachbearbeitungsschleife bzw. ihre Integration im Fertigungssystem wird in der Literatur kaum untersucht.

4 Betrieb von Fließfertigungssystemen

Im Folgenden wird sowohl auf die wichtigsten Planungs- und Steuerungsaufgaben als auch auf die verwendeten Vorgehensweisen zum Analysieren des Systemverhaltens eingegangen. Anschließend sind aufbauend auf die im zweiten, dritten und vierten Kapitel dargestellten Erkenntnisse die zu behandelten Schwerpunkte zu konkretisieren.

4.1 Betriebsverhalten eines Fließfertigungssystems

In der Betriebsphase sind eventuell entstehende stochastische Prozesse zu beachten und damit ihre Auswirkungen auf die erbrachte Leistung auch zu berücksichtigen. Um das Betriebsverhalten einer verketteten Fließlinie zu untersuchen, sollten die Kenngrößen für das gesamte System und seine Komponenten dargestellt werden, die prinzipiell in Stations-, Puffer- und Systemkenngrößen gliederbar sind.

4.1.1 Stationskenngrößen

Eine der wichtigsten Kenngrößen für die Stationen in den Fließfertigungssystemen lässt sich als die (mittlere) Taktzeit T_k definieren. Sie stellt die mittlere Bearbeitungszeit von Erzeugnissen in einer Station $t(S_k)$ dar, vgl. (Krüger T. , 2000, S. 11).

$$T_k = t(S_k) \quad (4.1)$$

Um weitere Kenngrößen der Station zu definieren, ist es sinnvoll, das Betriebsverhalten der Station abhängig von den Zeitdauern, -anteilen und der Wiederholung darzustellen. Abb. 4.1 zeigt ein Sankey-Diagramm für die Zeitanteile einer einzelnen Montagestation. Die organisatorischen Stillstandzeiten (T_O) beinhalten dabei ablauforganisatorische Wartezeiten wie z.B. bei kurzfristigem Auftragsmangel und beim Rüsten. Die Instandhaltungszeiten (T_W) fassen alle benötigten Zeiten zur Durchführung von geplanten Instandhaltungsaktivitäten zusammen. Da die Stationen mittels Material- und Informationsfluss miteinander verbunden sind, gewinnen die technische Ausfallzeit (T_T) und Folgeausfallzeit (T_{FS}) bei der Fließfertigung an Bedeutung. Zur T_T gehören alle Stör- oder Ausfalldauern, die durch Fehler in der Konzeption oder Ausführung einer Station verursacht werden. Zusätzlich zu den

lokal verursachten Ausfallzeiten treten auf den benachbarten verketteten Stationen systembedingte Folgeausfallzeiten T_{FS} auf, wobei Verkettungsverluste in Form von Wartezeiten und Blockierzeiten entstehen können.

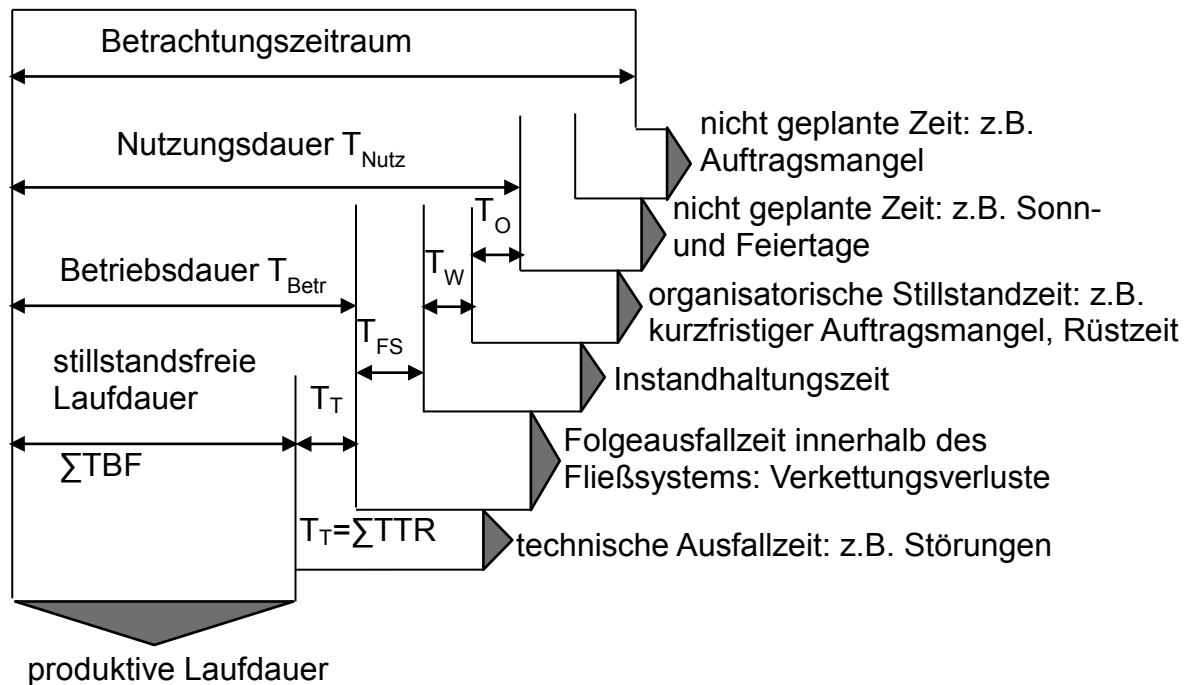


Abb. 4.1: Darstellung der Zeitanteile von Montagestationen, in Anlehnung an (VDI3423, 2011; Lotter & Wiendahl, 2006, S. 380)

Um die Auswirkungen der Kenngrößen T_T und T_{FS} auf die Stationsleistung zu betrachten, lassen sich drei Kenngrößen definieren: Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Nutzungsgrad. Betrachtet man Abb. 4.2, so lässt sich die produktive Laufdauer auch als mittlere Laufdauer $MTBF_k$ (engl. Mean Time Between Failures) der Station k bezeichnen. Sie gleicht dem durchschnittlichen Wert der einzelnen Laufdauerabschnitte.

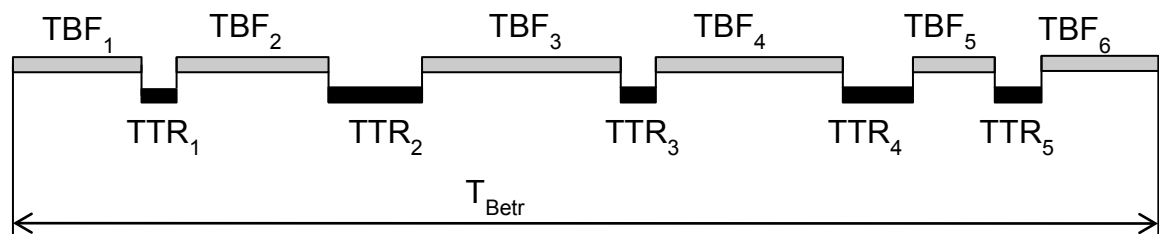


Abb. 4.2: Ausfalldauer- und Laufdauerabschnitte in einer betrachteten Betriebsdauer T_{Betr}

Die Ausfalldauerabschnitte TTR_i treten zwischen den Laufdauerabschnitten in unregelmäßiger Häufigkeit und Dauer ein. Analog zu $MTBF_k$ bilden diese die

mittlere Ausfall- bzw. Reparaturdauer $MTTR_k$ (engl. Mean Time To Repair) , vgl. (Winkelhake, 1989, S. 15; Walenda, 1991, S. 31).

$$MTBF_k = \frac{1}{\text{Anz. TBF}_k} \sum_i TBF_{i,k} \quad (4.2)$$

$$MTTR_k = \frac{1}{\text{Anz. TTR}_k} \sum_i TTR_{i,k} \quad (4.3)$$

Legende

$TBF_{i,k}$: Laufdauerabschnitt i der Station k , Anz. TBF_k : Anzahl der Laufdauerabschnitte der Station k , $MTBF_k$: mittlere Laufdauer der Station k , $TTR_{i,k}$: Ausfalldauerabschnitt i der Station k , Anz. TTR_k : Anzahl der Ausfalldauerabschnitte der Station k

Die Zuverlässigkeit Z_k einer Montagestation bezeichnet man als die Wahrscheinlichkeit, dass ein begonnener Bearbeitungszyklus vollständig und störungsfrei abgeschlossen wird, vgl. (Peschel, 1982).

$$Z_k = \frac{\text{Anzahl von korrekten Bearbeitungszyklen der Station } k}{\text{Anzahl von Bearbeitungszyklen der Station } k} = \frac{1}{1 + \frac{T_k}{MTBF_k}} \quad (4.4)$$

Es ist jedoch darauf zu achten, dass die Zuverlässigkeit einer Station eine ereignisbezogene Kenngröße ist. Im Gegensatz dazu stellt die technische Verfügbarkeit V_k eine zeitbezogene Kenngröße dar. Sie lässt sich aus der mittleren stillstandsfreien Laufdauer $MTBF_k$ und der mittleren Ausfalldauer $MTTR_k$ berechnen, vgl. z.B. (Walenda, 1991, S. 31; Maier, 2012, S. 17).

$$V_k = \frac{\sum_i TBF_{i,k}}{T_{\text{Betr},k}} = \frac{MTBF_k}{MTBF_k + MTTR_k} = \frac{1}{1 + \frac{MTTR_k}{MTBF_k}} \quad (4.5)$$

mit $T_{\text{Betr},k}$: Betriebsdauer der Station k

Die hier dargestellte Verfügbarkeit bezieht sich auf eine einzelne Station. Sie berücksichtigt nicht, dass bei verketteten Fließlinien Materialbereitstellung, Umrüsten, Störungen an anderen Stationen etc. zum Stillstand der gesamten Linie führen können.

Eine Kenngröße beinhaltet alle auftretenden Ausfallzeiten. Sie wird als Nutzungsgrad (N_k) der Station k bezeichnet. Sie gleicht dem Verhältnis von stillstandsfreien Laufdauern und Nutzungsdauer $T_{\text{Nutz},k}$, vgl. (Walenda, 1991, S. 32; Lotter & Wiendahl, 2006, S. 381).

$$N_k = \left(1 - \frac{T_O + T_T + T_W + T_{FS}}{T_{\text{Nutz},k}}\right) = \frac{\sum_i TBF_{i,k}}{T_{\text{Nutz},k}} \quad (4.6)$$

4.1.2 Pufferkenngrößen

Bevorzugt werden i.d.R. die Stationen in einer Fließlinie mittels Puffer verbunden, um Zeitverluste zu verringern. Diese Vorteile der Puffer hängen von zwei wesentlichen Kenngrößen ab: Pufferkapazität (N_W) und Verzögerungsdauer der Puffer (W_n). Die Pufferkapazität stellt den maximal möglichen Inhalt des Puffers dar, vgl. (Walenda, 1991, S. 33; Krüger T. , 2000, S. 13).

N_W : Kapazität des Puffers

Abb. 4.3 stellt die Einflüsse der Pufferkapazität bzw. des -inhalts auf die Betriebszustände benachbarter Stationen dar. Einerseits tritt Wartezeit auf der Station S_3 ein, wenn die Station S_2 gestört, der Puffer P_2 leer und die Station S_3 nicht belegt ist. Die Fähigkeit des Puffers P_2 , die Wirkungen der Störung zu vermeiden, ist abhängig von der Stördauer und seinem Inhalt an Erzeugnissen. Andererseits entsteht Blockierzeit auf der Station S_1 , wenn die Station S_2 gestört und der Puffer P_1 voll ist. Die Blockierzeit ist umso geringer, je größer die Kapazität des Puffers P_1 und je geringer die Störungsdauer ist. Schwanken die Bearbeitungszeiten der Stationen, so können ebenso Blockier- und/oder Wartezeiten entstehen. Abb. 4.3.c zeigt einen Blockier- und Wartezustand, wobei in einem kurzen Zeitraum die Station S_2 langsamer als S_1 und S_3 arbeitet.

Die Verzögerungsdauer oder Transportdauer des leeren Puffers P_2 gleicht der Zeitdauer, die vom Eintritt eines Erzeugnisses in den Puffer P_2 bis zum Verlassen zur nachfolgenden Station S_3 erforderlich ist. Insbesondere bei Förderstrecken hängt diese Zeitdauer von der Geschwindigkeit und Länge der Förderstrecke sowie der Länge der Erzeugnisse oder Werkstückträger ab, vgl. (Krüger T. , 2000, S. 13).

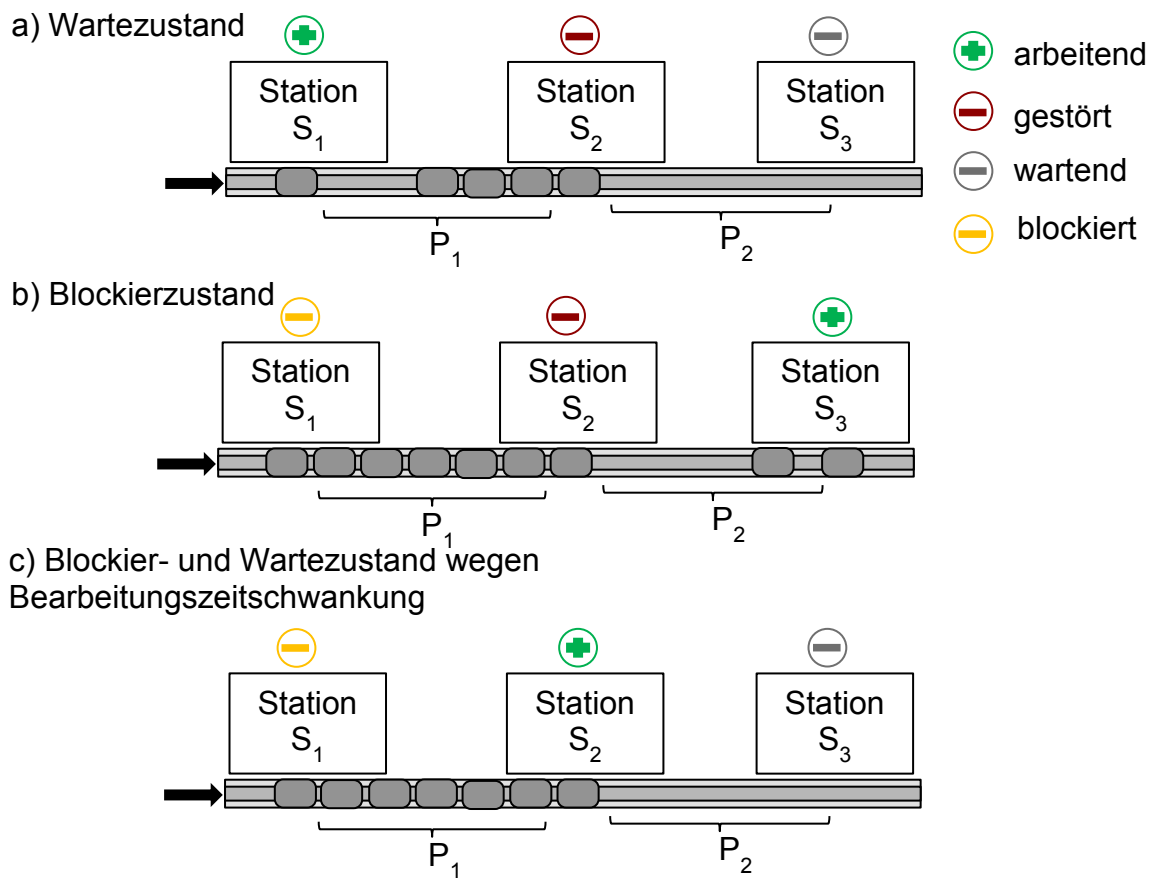


Abb. 4.3: Verkettungsverluste in Form von Warte- und Blockierzeit

Im Allgemeinen gilt:

$$W_n = \frac{N_W \cdot \text{mittlere Werkstücklänge im Puffer } n}{\text{mittlere Werkstückgeschwindigkeit im Puffer } n} \quad (4.7)$$

Solange der Transportvorgang eines Erzeugnisses während der Bearbeitung eines anderen Erzeugnisses auf der direkt nachfolgenden Station oder während des Wartens anderer Erzeugnisse auf der Förderstrecke auf die Bearbeitung ausgeführt wird, hat die Transportdauer W_n keinen Einfluss auf den Durchsatz der Fließlinie.

Sind Werkstückträger zum Transport von Erzeugnissen vorgesehen, so ist ihre Anzahl im System zu ermitteln. In der Montage sind Werkstückträger die Hilfsmittel, die Erzeugnisse von Station zu Station führen, wenn z.B. das Transportsystem sonst für die Weitergabe von Varianten mit unterschiedlichen Formen nicht geeignet ist. Weiterhin dienen die Werkstückträger dazu, die Erzeugnisse während des Durchlaufs zu schützen und darüber hinaus um ihre Positionen in den automatisierten Stationen genau zu bestimmen, vgl. (Scheid, 1988; Lotter & Wiendahl,

2006, S. 244f). Sie werden i.d.R. in geschlossenen Kreisläufen benutzt, um sie wieder verwenden zu können. Ihre maximal mögliche Anzahl lässt sich als die Summe der Puffer- und Stationsplätze im System berechnen.

In der vorliegenden Arbeit wird unterstellt, dass die Zuverlässigkeit von Puffern deutlich höher als die von Bearbeitungsstationen ist, so dass bei den Betrachtungen Störungen bzw. Ausfälle von Puffern vernachlässigt werden.

4.1.3 Systemkenngrößen

Die Bestimmung der Systemkenngrößen ist abhängig von der Verkettungsart. Insbesondere bei elastischer Verkettung erfolgt die Bestimmung von Verfügbarkeit und Nutzungsgrad des gesamten Systems aufgrund verschiedener Einflussfaktoren (z.B. Pufferkapazität, Störverhalten) nicht einfach bzw. unscharf. Dabei liefern die analytischen Formeln bzw. Näherungsverfahren keine übertragbaren Aussagen über Gesamtverfügbarkeit und -nutzungsgrad, da die Betrachtung der Wechselbeziehungen zwischen den Einflüssen stochastischer Störungen und den Pufferkapazitäten analytisch nicht möglich ist, vgl. (Krüger T. , 2000, S. 16f; Lotter & Wiendahl, 2006, S. 392). Dementsprechend ist hierbei die Verwendung der Simulation erforderlich. Im Folgenden wird das Störverhalten kurz beschrieben. Weiterhin werden Formeln zur Berechnung der Systemkenngrößen im Allgemeinen erwähnt, die zudem mithilfe der Simulation zu benutzen sind. Anschließend werden Formeln in besonderen Fällen (bei loser und starrer Verkettung) dargestellt.

4.1.3.1 Störverhalten

Störungen treten unregelmäßig²⁷ aus verschiedenen Gründen auf den Stationen auf. Technische Defekte, Werkzeugbruch, fremde Teile, Verunreinigung, Probleme bei Materialzuführung und Werkstücke, die die Maßtoleranz nicht halten, sind Beispiele für die Ursachen der Arbeitsunterbrechungen. Die Stördauer wird in dieser Arbeit bezeichnet als die Zeitspanne von der Entstehung einer Störung bis zur vollständigen Behebung der Störung. Aufgrund der unterschiedlichen Stördauer und störungsfreien Laufzeit einer Station werden diese Parameter durch Häufigkeitsverteilungen dargestellt. Jedoch ist zu beachten, dass die Stationsverfügbarkeit keine eindeutigen Aussagen über das Störverhalten ergibt, da der Ver-

²⁷ Tätigkeiten, wie geplante Instandhaltung oder geplanter Wechsel von Werkzeugen oder Werkzeuggruppen werden bei (Kuhn, 1998, S. 38) als kalenderzeitabhängige Störung (vorbeugende Instandsetzung) bezeichnet.

fügarkeitswert nur von den Werten MTTR und MTTF abhängig ist. Mit gleichen Verfügbarkeitswerten können die Puffer bei Fließlinien mit vielen kurzen Störungen effektiver als im Fall länger Störungen mit geringer Anzahl sein und daher ergibt sich ein höherer Durchsatz im ersten Fall, vgl. (Kuhn, 1998, S. 30). Somit ist die Angabe der Verfügbarkeit nicht ausreichend zur Beschreibung der Leistung von Fließsystemen. Vielmehr gibt der Nutzungsgrad eine eindeutige Vorstellung der Systemleistung, da hierbei die externen und internen Stillstände berücksichtigt werden.

4.1.3.2 Bestimmung von Systemkenngrößen

Für die Bestimmung des Nutzungsgrads des gesamten Fließsystems N_{Sy} (Syn. Gesamtsystemnutzungsgrad oder nur Gesamtnutzungsgrad) müssen sowohl die Summe der produktiven Laufdauer aller Stationen im System $\sum_i TBF_{i,Sy}$ als auch alle Stillstände im System beachtet werden. Es gilt nach (Lotter & Wiendahl, 2006, S. 386) die folgende Formel:

$$N_{Sy} = \frac{\sum_i TBF_{i,Sy}}{T_{Nutz,Sy}} \quad (4.8)$$

Dabei kennzeichnet $T_{Nutz,Sy}$ die Summe der Nutzungsdauer aller Stationen im Fließsystem. Analog wird die Gesamtverfügbarkeit V_{Sy} als das Verhältnis zwischen $\sum_i TBF_{i,Sy}$ und $T_{Betr,Sy}$ berechnet. Die Kenngröße $T_{Betr,Sy}$ wird als die Summe der Betriebsdauern aller verketteten Stationen im System (Syn. Betriebsdauer des Systems) bezeichnet, vgl. (Lotter & Wiendahl, 2006, S. 387).

$$V_{Sy} = \frac{\sum_i TBF_{i,Sy}}{T_{Betr,Sy}} \quad (4.9)$$

4.1.3.3 Bestimmung von Systemkenngrößen in besonderen Fällen

Bei starrer Verkettung wird bei der Beurteilung der Verfügbarkeit des gesamten Systems angenommen, dass das Störverhalten auf das einer elektronischen Schaltung abgestimmt ist, (Bullinger, Rieth, & Euler, 1993, S. 167f). Beachtet man diese Annahme, so kann man dementsprechend die Gesamtverfügbarkeit durch die Multiplikation der Einzelverfügbarkeiten V_k ($k = 1, 2, 3, \dots, M$) der Stationen bestimmen, vgl. (VDI636, 1987, S. 28). Mithilfe der Formel (4.10) versteht man, dass die daraus resultierende Gesamtverfügbarkeit umso geringer ist, je geringer die Verfügbarkeiten einzelner Stationen sind und je höher die Anzahl verketteter Stationen ist.

$$V_{Sy} = V_1 \cdot V_2 \cdot V_3 \cdot \dots \cdot V_M \quad (4.10)$$

Sind die Stationen parallel geschaltet (Redundanz), so wird die folgende Formel benutzt, vgl. (VDI636, 1987, S. 28):

$$V_{Sy} = 1 - [(1 - V_1)(1 - V_2)(1 - V_3) \dots (1 - V_M)] \quad (4.11)$$

Bei loser Verkettung, wobei definitionsgemäß keine organisatorischen Stillstände auf den Stationen auftreten, lässt sich das Systemverhalten durch die Engpassstation bestimmen. Indikatoren zur Festlegung des Engpasses können in diesem Fall die kleinste Verfügbarkeit, die größte Taktzeit oder die geringste Zuverlässigkeit sein, vgl. (Walenda, 1991; Krüger T. , 2000, S. 14). Unter der Annahme, dass die Station mit der größten Taktzeit als Engpassstation definiert ist, ergibt sich die Gesamtverfügbarkeit aus dem Verhältnis von produktiver Zeit der Engpassstation ($\sum_i TBF_{i,Eng}$) und der Betriebsdauer des Systems, vgl. (Walenda, 1991, S. 35).

$$V_{Sy} = \frac{\sum_i TBF_{i,Eng}}{T_{Betr,Sy}} \quad (4.12)$$

Analog zum Stationsnutzungsgrad, wird der Gesamtnutzungsgrad durch das Verhältnis der produktiven Zeit des Engpasses zur gesamten Nutzungsdauer ermittelt.

$$N_{Sy} = \frac{\sum_i TBF_{i,Eng}}{T_{Nutz,Sy}} \quad (4.13)$$

4.1.4 Beispiele für Stations-, Puffer- und Systemkenngößen

In diesem Abschnitt wird eine Recherche über die in der Fachliteratur untersuchten Kenngößen der Stationen und Puffer in der Fließfertigung durchgeführt. Das Ziel ist dabei, praktische Daten für die Simulationsuntersuchungen zu erfassen. Tab. 4.1 fasst eine Auswahl der Forschungsansätze zusammen, die typische Kenngößen in der Fließfertigung einbeziehen.

Tab. 4.1: Literaturüberblick: Beispiele für Stations-, Puffer- und Systemkenngrößen

Quelle	Stationskenngrößen	Kenngrößen für Puffer mit Transportfunktion: Fördergeschwindigkeit	Systemkenngrößen
(Walenda, 1991)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ T_k: 1-30 s; typ.: 3-10 s ▪ V_k: 91,1-97,1 %, Mitt.: 94,8 % ▪ N_k: 68,5-82,1 %, Mitt.: 75,2 % 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kettenförderer: 0,08-0,3 m/s ▪ Doppelgurtbandförderer: 0,15 oder 0,2 m/s 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ V_{Sy}: 56,7-96,1 %, Mitt.: 79,5 % ▪ N_{Sy} verringert sich weiter
(Krüger T. , 2000)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $T_k = 9$ s ▪ typ. Stördauer ist weniger als 3Min 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Transportdauer ist vernachlässigbar 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ N_{Sy}: 50-80 %, am häufigsten: 60-70 %
(Lotter & Wiendahl, 2006)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $T_k = 10$ und 20 s ▪ $V_k = 95$ %, $N_k = 75$ % 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Objektgeschwindigkeit: 0,5 bis 1,5 m/Min. ▪ Staurollenförderer: 6-12 m/Min ▪ Linearmotorenförderer: 2 m/s 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $N_{Sy} = 70,6$ %
(Ten Hompel, Schmidt, & Nagel, 2007)	- - -	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Angetriebene Rollbahn: typ. 0,3-0,5 m/s, (0,1-2 m/s) ▪ Tragkettenförderer: typ. 0,2-0,5 m/s ▪ Kettenfördersysteme: 1-100 m/Min 	- - -

4.2 Analyse des Systemverhaltens

Die Auswirkungen von Störungen und Bearbeitungszeitschwankungen auf die Leistung eines Fließsystems sowie auch die Zusammenhänge mit Pufferwirkungen lassen sich nicht einfach bestimmen. Vielmehr ist dabei der Einsatz komplexer mathematischer Verfahren und/oder der Simulation erforderlich.

4.2.1 Analytische Vorgehensweise

Es geht um mathematische Modelle, in denen qualitative Aussagen abgeleitet werden können, die i.d.R. über die Effekte einflussreicher Kenngrößen erstellt werden. Die Hauptschwierigkeit bei der Bildung deduktiver Modelle besteht häufig nicht in der mathematischen Formulierung, sondern in dem Erkennen aller relevanten maßgeblichen Parameterzusammenhänge, vgl. (Nyhuis & Wiendahl, 1999, S. 39). Die abgeleitete mathematische Beschreibung der Abhängigkeiten zwi-

schen Einfluss- und Wirkungsgröße besitzt dabei verlässliche Gesetzmäßigkeiten und lässt sich deshalb generell in der Praxis verwenden.

4.2.1.1 Warteschlangenmodelle

Das Phänomen der Warteschlange entsteht im Allgemeinen, wenn zu einem Zeitpunkt die Nachfrage nach einer Bedienung die verfügbare Kapazität übersteigt. Dies ist in der Praxis häufig anzutreffen, wenn z.B. Erzeugnisse auf die Bearbeitung in der nächsten Station warten. Ursache dafür ist meistens die Entstehung stochastischer Prozesse. Ihre Wirkungen auf das Systemverhalten können durch unterschiedliche mathematische Ansätze beschrieben werden, die in Warteschlangenmodellen dargestellt werden.

Die Warteschlangentheorie beschäftigt sich mit der Beschreibung und Bewertung von Bedienungs- bzw. Bearbeitungssystemen und vor allem mit der mathematischen Untersuchung von Warteschlangen. Die aus der Warteschlangentheorie gewonnenen Erkenntnisse lassen sich auf verschiedene Gebiete übertragen, um Informationen über das Verhalten von Warteschlangensystemen zu bekommen. Ihre Anwendung liegt sowohl bei der Planung als auch bei der Steuerung von Arbeitssystemen vor, vgl. (Lorenz, 1984, S. 2).

Bei Fließfertigungssystemen gleicht die Länge einer Warteschlange in einem Warteraum der Menge der wartenden Erzeugnisse in diesem Warteraum, im Weiteren als Puffer bezeichnet. Die berechnete mittlere Warteschlangenlänge gilt als entscheidender Wert für die Dimensionierung der Puffergröße, vgl. (Arnold & Furmans, 2005, S. 112). Die Informationen über den Verlauf von Ankunfts- und Ausführungsprozessen sind erforderlich zur Berechnung der mittleren Warteschlangenlänge vor einer Station.

Wartesystem

Die einfachste Version eines Wartesystems besteht aus einer Bedienstelle und einem Warteraum²⁸, vgl. Abb. 4.4. Die Erzeugnisse treffen im Wartesystem mit stochastischen Zwischenankunftszeiten t_a ein. Mithilfe des Erwartungswerts (Mittelwert) $E(t_a)$ dieser Zwischenankunftszeiten lässt sich die Ankunftsrate λ nach der Formel (4.14) berechnen. Sie gibt die Anzahl der ankommenden Erzeugnisse pro ZE an.

²⁸ Im Folgenden werden die Begriffe „Station“ und „Puffer“ verwendet. Beispielsweise mag es auch sein, dass ein Puffer viele parallele Stationen bedient.

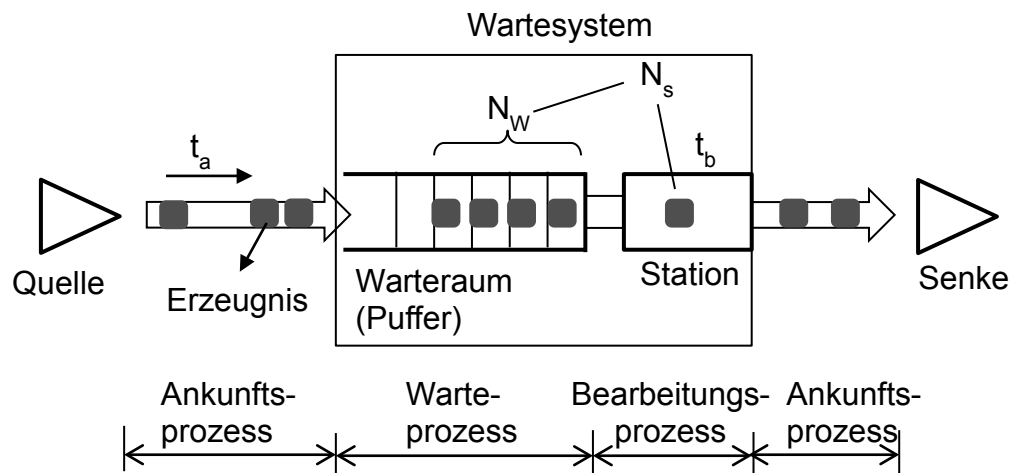


Abb. 4.4: Darstellung eines Wartesystems, in Anlehnung an (Arnold & Furmans, 2005, S. 113)

In der Station werden die Erzeugnisse mit streuenden Bearbeitungszeiten t_b bearbeitet. Die Bearbeitungsrate μ (Bedienrate) wird ebenso durch den Kehrwert des Erwartungswerts der Bearbeitungszeit berechnet:

$$\lambda = \frac{1}{E(t_a)} \quad (4.14)$$

$$\mu = \frac{1}{E(t_b)} \quad (4.15)$$

Das Verhältnis zwischen Ankunfts- und Bearbeitungsrate wird als Auslastungsgrad (ρ) bezeichnet:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{E(t_b)}{E(t_a)} \quad (4.16)$$

Unter der Annahme, dass ρ kleiner als eins ist, die Zeitwerte (t_a und t_b) konstant sind, und die Station niemals ausfällt, entsteht keine Warteschlange im Puffer. Wird aber zumindest einer der beiden Prozesse als stochastischer Prozess bezeichnet, so warten für $\rho < 1$ Erzeugnisse im Puffer. Werden die Pufferinhalte für hinreichend lange Zeitdauer betrachtet, so kann die Länge der Warteschlange als Mittelwert²⁹ N_W dargestellt werden. Die Größe N_S gibt die mittlere Anzahl von Erzeugnissen im Wartesystem (im Warteraum und in verbundenen Stationen) an.

²⁹ Im Rahmen der Warteschlangenmodelle bzw. der analytischen Methode wird das Symbol N_W (vgl. Abs. 4.1.2) auch zur Bezeichnung des Mittelwerts der Pufferkapazitäten benutzt.

Zur Klassifikation der Wartesystem-Modelle werden meist fünf Größen eingesetzt, vgl. (Lorenz, 1984, S. 26): A/B/m/K/xxxx

Die beiden ersten Symbole stellen das Ankunftsprozessverhalten (A) bzw. das Bearbeitungsprozessverhalten (B) dar. Sie werden über die Verteilungen der Zwischenereigniszeiten beschrieben. Dabei müssen der Verteilungstyp, der Mittelwert und erforderlichenfalls die Angaben des Variationskoeffizienten der Ankunftszeiten VK_a bzw. Bearbeitungszeiten VK_b bekannt sein. Der Wert des Variationskoeffizienten gibt eine Information über das relative Streuungsmaß der Verteilung und wird als Verhältnis zwischen Standardabweichung und Mittelwert berechnet. Die Wurzel aus der Varianz (Var) ergibt dabei die Standardabweichung.

$$VK_a = \frac{\sqrt{\text{Var}(t_a)}}{E(t_a)} \quad (4.17)$$

$$VK_b = \frac{\sqrt{\text{Var}(t_b)}}{E(t_b)} \quad (4.18)$$

Die Größe m kennzeichnet die Anzahl paralleler und identischer Stationen im Wartesystem. Mit $K = \infty$ wird angenommen, dass im System immer genug Pufferplätze für die Aufnahme neuer Erzeugnisse vorhanden sind. Da die meisten Modelle, auch in der vorliegenden Arbeit, von unbegrenzten Warteplätzen ausgehen, wird K nicht weiter erwähnt. Die Bearbeitungsreihenfolge von Erzeugnissen (Bedienstrategie) wird durch das Kennzeichen „xxxx“ beschrieben. Im Prinzip erfolgt die Entnahme von Erzeugnissen aus dem Puffer nach dem FIFO-Prinzip, d.h. es wird keine Prioritätsregel festgelegt. Dementsprechend werden die Wartesystem-Modelle meist nur mit den drei Größen (A/B/m) kennzeichnet. Für die Notation von Zeitverteilungen gelten die folgenden Symbole:

- M Exponentialverteilung mit Variationskoeffizient $VK = 1$: Die Prozesse, die durch die Exponentialverteilung gekennzeichnet werden, besitzen die sog. Markov-Eigenschaft, die auch als „fehlendes Erinnerungsvermögen“ bezeichnet wird.
- E_k Erlangverteilung mit k Stufen
- D Dirac-Verteilung mit $VK = 0$
- G allgemeine (generelle) Verteilung: Bei der generellen Verteilung lassen sich nur der Mittelwert, die Varianz und der Variationskoeffizient bestimmen. Ihre Verteilungsform ist aber nicht bekannt.

Warteschlangentheorie zur Modellierung von Fertigungslinien

Die Modellierung eines Wartesystems durch die Warteschlangentheorie setzt im Prinzip voraus, dass die Ankunfts- und Bearbeitungsprozesse unabhängig voneinander sind. Das ist aber bei Fließlinien, in denen die Stationen eng miteinander verbunden sind, nicht der Fall. Dem Output einer Station entspricht der Input der nachstehenden Station. In diesem Zusammenhang sind die Bearbeitungsdauern bzw. ihre Verteilung in einer Station und die Zwischenankunftszeiten bezüglich der nächsten Station bzw. ihre Verteilung gleich. Weiterhin sind die Auswirkungen von Verkettungsverlusten zu berücksichtigen.

Um das Modellierungsproblem zu vermeiden, zerlegt man häufig das gesamte Fließsystem in mehrere kleine fiktive Subsysteme mit fiktiven Stationen, vgl. Abb. 4.5.

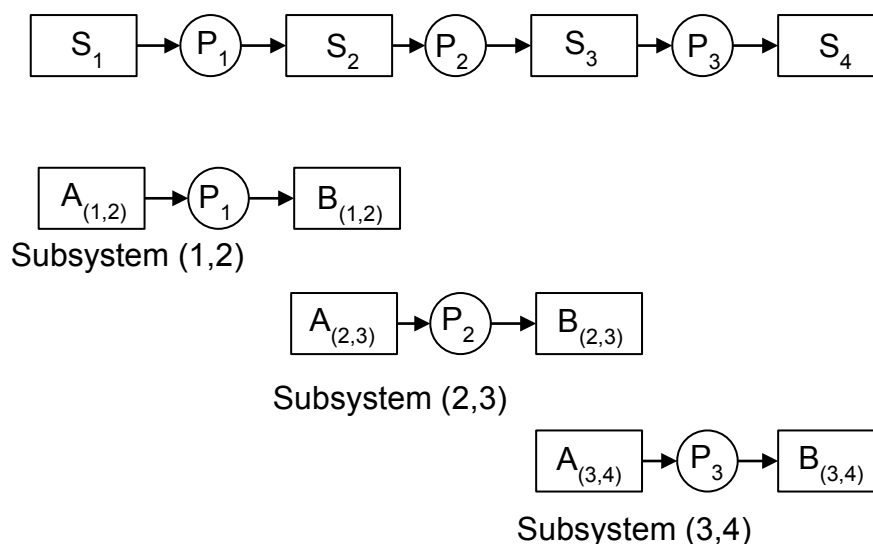


Abb. 4.5: Dekomposition eines Fließsystems in Subsysteme, in Anlehnung an (Kuhn & Tempelmeier, 1997)

Je zwei benachbarte fiktive Stationen (z.B. $A_{(1,2)}, B_{(1,2)}$) bilden mit dem dazwischen liegenden Puffer P_1 ein Subsystem. Die Bearbeitungszeiten bzw. Eigenschaften der fiktiven Stationen und das Materialflussverhalten im jeweiligen Puffer müssen das reale System hinreichend genau abstrahieren. Weitere Detaillierungen zu diesen Verfahren finden sich z.B. in (Dallery & Gershwin, 1992; Kuhn & Tempelmeier, 1997). Die Frage, ob die Warteschlangentheorie zur Modellierung des Verhaltens realer Fließlinien geeignet ist, bildet eine weitere Herausforderung. Das Problem

wurde im Grunde durch die Entwicklung von GI³⁰/G/1-Modellen gelöst. In diesem Fall lässt sich eine Fließlinie durch eine Folge von GI/G/1- oder GI/G/m- Wartesystemen abbilden, vgl. (Kistner, 2007). Die Verteilung der Zwischenankunfts- bzw. Bearbeitungszeiten ist die generelle Verteilung. Diese Modelle liefern nur Näherungsformeln zur Beschreibung von Systemkenngrößen.

Ein Überblick über die Näherungsformeln für die verschiedenen Wartemodelle finden sich z.B. in (Bolch, Greiner, de Meer, & Trivedi, 2006). Für das GI/GI/1-Modell gibt die Krämer-Langenbach-Belz-Approximation die mittlere Wartezeit (\bar{W}) im Puffer:

$$\bar{W} \approx \frac{\rho/\mu}{1-\rho} \cdot \frac{VK_a^2 + VK_b^2}{2} \cdot G_{KLB} \quad (4.19)$$

Der Korrekturfaktor G_{KLB} wird wie folgt definiert:

$$G_{KLB} = \begin{cases} \exp\left(-\frac{2}{3} \cdot \frac{1-\rho}{\rho} \cdot \frac{(1-VK_a^2)^2}{VK_a^2 + VK_b^2}\right), & 0 \leq VK_a \leq 1 \\ \exp\left(-(1-\rho) \frac{VK_a^2 - 1}{VK_a^2 + 4VK_b^2}\right), & VK_a > 1 \end{cases} \quad (4.20)$$

Zur Berechnung der mittleren Wartezeit (\bar{W}) im Puffer für das GI/G/m-Modell ist die Allen-Cunneen (A-C)-Formel die meist bekannte Approximation:

$$\bar{W} \approx \frac{P_m/\mu}{1-\rho} \cdot \frac{VK_a^2 + VK_b^2}{2m} \quad (4.21)$$

Dabei gibt P_m (engl. waiting probability) die Wahrscheinlichkeit an, dass ein Ereignis nicht sofort bearbeitet werden kann. Diese Approximation wurde von Krämer-Langenbach-Belz mithilfe des Korrekturfaktors G_{KLB} und von Kulbatzki durch den Exponent $f(VK_a, VK_b, \rho)$ weiterentwickelt:

$$\bar{W} \approx \frac{P_m/\mu}{1-\rho} \cdot \frac{VK_a^2 + VK_b^2}{2m} \cdot G_{KLB}; \quad (4.22)$$

³⁰ Das Symbol GI bedeutet, dass die Ankunftsprozesse unabhängig voneinander sind (engl. general independent). In dieser Arbeit sind die Symbole GI und G synonym.

$$G_{KLB} = \begin{cases} \exp\left(-\frac{2}{3} \cdot \frac{1-\rho}{P_m} \cdot \frac{(1-VK_a^2)^2}{VK_a^2 + VK_b^2}\right), & 0 \leq VK_a \leq 1 \\ \exp\left(-(1-\rho) \frac{VK_a^2 - 1}{VK_a^2 + VK_b^2}\right), & VK_a > 1 \end{cases} \quad (4.23)$$

Die Approximation von Kulbatzki lautet:

$$\bar{W} \approx \frac{P_m/\mu}{1-\rho} \cdot \frac{VK_a^{f(VK_a, VK_b, \rho)} + VK_b^2}{2m}; \quad (4.24)$$

$$f(VK_a, VK_b, \rho) = \begin{cases} 1, & VK_a \in \{0,1\}, \\ [\rho(14,1VK_a - 5,9) + (-13,7VK_a + 4,1)]VK_b^2 \\ + [\rho(-59,7VK_a + 21,1) + (54,9VK_a - 16,3)]VK_b \\ + [\rho(VK_a - 4,5) + (-1,5VK_a + 6,55)], & 0 \leq VK_a \leq 1, \\ -0,75\rho + 2,775, & VK_a > 1 \end{cases} \quad (4.25)$$

Die mittlere Anzahl von Erzeugnissen im Puffer N_W oder im Wartesystem N_S lässt sich durch Little's Gesetz berechnen. Die folgenden Formeln von Little's Gesetz kann man für alle Wartemodelle benutzen.

$$N_W = \lambda \bar{W} \quad (4.26)$$

$$N_S = \lambda \bar{T} \quad (4.27)$$

Dabei ist \bar{T} die mittlere Wartezeit von Erzeugnissen im Wartesystem

Die Annahme, dass die Puffergrößen zwischen den Stationen unbeschränkt sind, ist jedoch nicht realistisch. Um das Problem zu behandeln, wurden durch sehr komplizierte theoretische Behandlung Approximationen für das GI/G/1/K-Modell abgeleitet, vgl. (Buzacott, Liu, & Shanthikumar, 1995).

4.2.1.2 Allgemeine Approximationsformeln

Ohne Bezug auf die Puffereinflüsse hat Muth ausgehend von identischen Stationen eine Approximation zur Berechnung der Stationsausleistung ρ durch theoretische Analysen und mithilfe der Simulation entwickelt, vgl. (Muth, 1987):

$$\rho = \frac{1}{1 + \frac{1,67 \cdot (M - 1) \cdot VK}{1 + M + 0,31 \cdot VK}} \quad (4.28)$$

Mit Unterstützung von Simulationsstudien wurde gezeigt, dass bei identischen Stationen identische Puffergrößen zum höchsten Durchsatz führen, vgl. (Conway, Maxwell, McClain, & Thomas, 1988). Diese Approximationsformel (4.28) wurde später in (Blumenfeld, 1990) durch die Berücksichtigung der Einflüsse der Einstellung eines gleichartigen Puffers zwischen jeweils zwei benachbarten Stationen weiterentwickelt:

$$\rho = \frac{1}{1 + \frac{1,67 \cdot (M - 1) \cdot VK}{1 + M + 0,31 \cdot VK + 1,67 \cdot M \cdot N_W / 2 \cdot VK}} \quad (4.29)$$

Es wurde hier davon ausgegangen, dass keine Warte- bzw. Blockierzeiten an der ersten bzw. letzten Station auftreten dürfen. Die letzte Formel zeigt deutlich, dass die Puffer umso größer auszulegen sind, je höher die Stationsanzahl und/oder der Variationskoeffizient sind.

Für den Fall, dass Störungen in den Stationen auftreten, wurden entsprechenden Approximationsformeln in (Blumenfeld & Li, 2005) entwickelt.

4.2.1.3 Trichtermodell

Das Zugangs- und Abgangsverhalten einer Montagestation³¹ und der eventuell entstehende Warteprozess der Erzeugnisse vor dieser Station lassen sich einfach durch das Trichtermodell darstellen, vgl. (Wiendahl, 2005, S. 266). Der Trichteröffnung entspricht die Leistung der Station. Beispielsweise, falls die Fertigungsgeschwindigkeit der Station S_3 geringer als bei den Vorgängern ist oder die Stationsbearbeitungszeiten schwanken, entsteht eine Warteschlange vor der Station S_3 . Diese Warteschlange wird in dem Trichtermodell als Bestand bezeichnet, vgl. Abb. 4.6.b. Im Durchlaufdiagramm werden die ankommenden und bereits bearbeiteten Erzeugnisse (in Erzeugnismenge) in einem System über die Zeit kumulativ veranschaulicht, vgl. Abb. 4.6.c. Unter Bezugnahme auf die Zu- bzw. Abgangskurven charakterisieren die vertikalen Schritte die Menge der ankommenden Erzeugnisse oder Aufträge und die horizontalen Schritte die Bearbeitungsdauer. Diese Schritte werden als Durchlaufelemente bezeichnet.

³¹ Vgl. Abb. 4.6.a und Abb. 5.7.

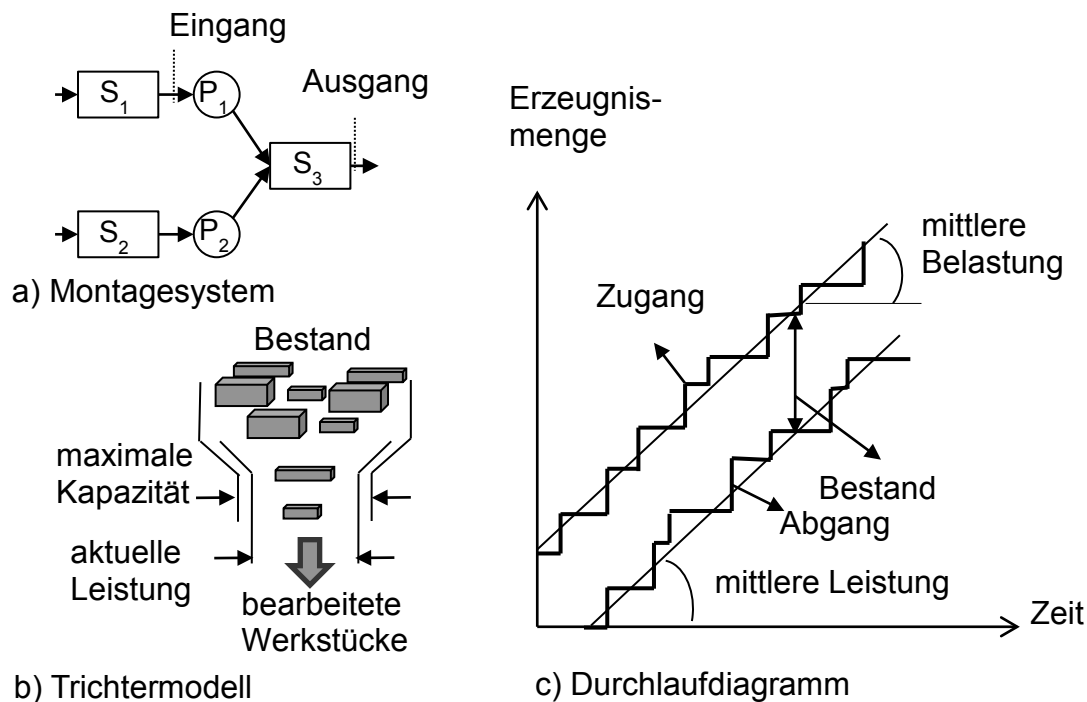


Abb. 4.6: Darstellung von allgemeinem Trichtermodell und Durchlaufdiagramm, in Anlehnung an z.B. (Nyhuis & Wiendahl, 1999, S. 25)

Die mittlere Steigerung der Zugangskurve bzw. Abgangskurve wird als die mittlere Belastung bzw. Leistung bezeichnet. Mit Zeitbezügen lässt sich der Bestand zwischen zwei Segmenten wegen dem Unterschied von Stationsleistungen ändern. Für einen langen Betrachtungszeitraum, wobei das System als eingeschwungen gilt, müssen die mittleren Belastungs- und Leistungslinien parallel laufen, vgl. (Nyhuis & Wiendahl, 1999, S. 25; Kumpf, 2001, S. 34). Der vertikale Abstand zwischen den Belastungs- und Leistungslinien kennzeichnet den mittleren Bestand, der im Folgenden nur Bestand genannt wird.

4.2.1.4 Nichtlinearer Materialfluss

Ein nichtlinearer Materialfluss ist durch die Verzweigung oder Zusammenführung von Materialströmen charakterisiert. Dementsprechend wird ein Fließsystem als nichtlinear bezeichnet, wenn es entweder mindestens ein Zusammenführungs- oder Verzweigungselement beinhaltet. Diese Elemente lassen sich als Vernetzungselemente bezeichnen. Die Materialien (Erzeugnisse) können an diesen Vernetzungselementen ihre Richtung im Fließsystem ändern. Beispiele für diese Elemente sind Verschiebewagen, Drehscheibe, Weichen, Hub- und Senkstation etc.

Die Abb. 4.7 stellt ein Verzweigungs- (a) und Zusammenführungselement (b) der Ordnung³² 3 innerhalb eines Materialflusssystems schematisch dar.

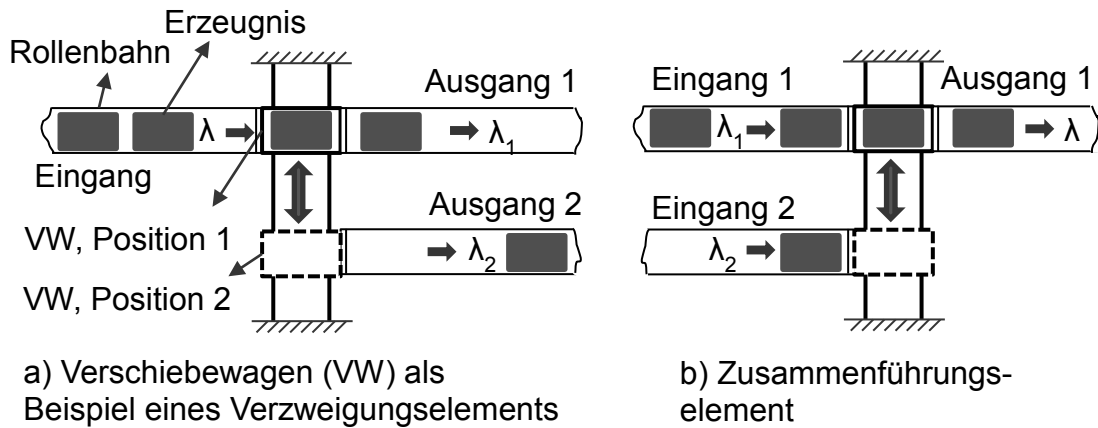


Abb. 4.7: Verzweigungs- und Zusammenführungselemente

Der Verschiebewagen kann zwischen zwei Positionen bewegt werden. Die Verbindung zwischen Eingängen und Ausgängen kann stetig oder unstetig sein. Befindet sich der Verschiebewagen in der Position 1, so verbindet er den Eingang mit dem Ausgang 1. Die Erzeugnisse werden bei stationärem Verschiebewagen stetig transportiert. Das Verzweigungselement wird dabei als stetig bezeichnet. Das Transportieren von Erzeugnissen jeweils vom Eingang zum Ausgang 2 erfordert dagegen die Bewegung des Verschiebewagens zwischen den Positionen 1 und 2 (unstetig). Allerdings wird die Beziehung zwischen den Ankunftsrate, auch als Einlaufströme bzw. Auslaufströme bezeichnet, an beiden Seiten des Vernetzungselements wie folgt gegeben, vgl. (Großeschallau, 1984, S. 81; Gudehus, 2005, S. 490):

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 \quad (4.30)$$

Ist die Fahrzeit zwischen den beiden Positionen vernachlässigbar³³, so lassen sich die Ströme λ_1 und λ_2 für eine lange Betrachtungszeit mithilfe der Mengenanteile q_1 , q_2 berechnen, vgl. (Arnold & Furmans, 2005, S. 30):

$$\lambda_1 = \lambda \cdot q_1 \quad (4.31)$$

³² Die Ordnungsnummer bezeichnet die Anzahl der Eingänge und Ausgänge eines Vernetzungselementes.

³³ Der Fall, in dem die Transportzeit nicht vernachlässigt wird, wird bei (Großeschallau, 1984; Arnold & Furmans, 2005) untersucht.

$$\lambda_2 = \lambda \cdot q_2 \quad (4.32)$$

Der Mengenanteil beschreibt u.a. die Wahrscheinlichkeit, dass ein Erzeugnis zum Ausgang 1 (q_1) bzw. 2 (q_2) weitergegeben wird (Abb. 4.7.a) oder dass ein Erzeugnis vom Eingang 1 (q_1) bzw. 2 (q_2) zum Ausgang 1 transportiert wird (Abb. 4.7.b). Es gilt auch:

$$q_2 = (1 - q_1) \quad (4.33)$$

Im Allgemeinen ergibt sich die Beziehung zwischen den Strömen für mehrere Eingänge (λ_i ; $i=1,2,\dots,m$) und mehrere Ausgänge (λ_j ; $j=1,2,\dots,n$) wie folgt:

$$\lambda = \sum_i^m \lambda_i = \sum_j^n \lambda_j \quad (4.34)$$

4.2.2 Simulation

Simulation ist ein anerkanntes Werkzeug zur Untersuchung, Auslegung, und Verbesserung komplexer Systeme. Sie ist durch die Bildung experimenteller Modelle charakterisiert, deren Strukturen, Elemente und Kenngrößen die realen Systeme bzw. ihre Eigenschaften nachahmen. Mit Simulationsmodellen lassen sich Simulationsexperimente vorbereiten, durchführen und auswerten. Im Gegensatz zu analytischen Methoden gibt die Simulation dem Planer in der Planungsphase Informationen über das Systemverhalten, wenn einer oder mehrere Parameter variieren. Dadurch lassen sich optimierte Lösungen finden. Vorab sind die Kenngrößen, die das Systemverhalten beeinflussen, und ihre Wechselwirkungen zu definieren. Ist das Ziel der Simulation festgelegt, werden die sie beeinflussenden Kenngrößen betrachtet bzw. untersucht. Auf diese Weise wird entsprechend des Ziels bzw. der gewünschten Ergebnisgenauigkeit die erforderliche Modelldetaillierung abgestimmt.

Die empirische Untersuchung eines Modellverhaltens erfolgt durch wiederholte Abläufe von Simulationsexperimenten mit konsequenter Variation von Parameterwerten und/oder Modellstrukturen, vgl. (VDI3633, 2000). Da die Simulation selbst keine Optimierung beinhaltet, sind die Experimentdauern, -anzahl, Untersuchungsparameter und zu untersuchenden Parameterwerte vom Simulationsbenutzer zu planen.

Allgemeines zur Simulationsuntersuchung

Damit die Simulationsergebnisse in der Praxis nutzbar sein können, sind bei der Datenvorbereitung, Erstellung und Untersuchung von Simulationsmodellen mehrere systematische Schritte zu erfüllen. Diese lassen sich in drei Phasen gliedern: Vorbereitung, Durchführung und Auswertung, vgl. (VDI3633, 2000).

Im Zuge der Vorbereitung ist zunächst die Simulationswürdigkeit der Problemstellung zu beurteilen. Dabei werden Themen wie z.B. die Schwierigkeit des Problems, Genauigkeit bzw. Zuverlässigkeit analytischer Methoden und der Zeit- und Kostenaufwand im Vergleich zur analytischen Methode behandelt. Im Mittelpunkt dieser Phase ist das Zielsystem darzustellen, wobei die wesentlichen Kenngrößen charakterisiert werden, die sowohl das Systemverhalten beschreiben als auch zur Lösung seiner Aufgaben anzuwenden sind. Die Beschreibung der Daten technischer Systeme bildet die Simulationsdatenbasis. Diese Daten müssen sorgfältig gesammelt und vorbereitet werden. Die Datenqualität hat einen erheblichen Einfluss auf die Qualität der Simulationsergebnisse. Anschließend wird das zu experimentierende System in ein Softwaremodell umgesetzt, mit dem dann Experimente durchgeführt werden können. Parallel wird der Detaillierungsgrad des Modells festgelegt.

Da das Modell i.d.R. nicht alle Aspekte und Parameter berücksichtigen kann, ist eine Prüfung auf hinreichende Übereinstimmung zwischen technischem System und Modell durch eine Verifizierung und Validierung durchzuführen. Die Modellverifizierung dient zur Überprüfung der inneren Systematik des Simulationsmodells. In diesem Schritt muss man sicher sein, dass alle wesentlichen Details berücksichtigt werden und weiterhin das Modell keine semantischen und syntaktischen Fehler beinhaltet, vgl. (Košturiak & Gregor, 1995, S. 123). Eine Modellvalidierung muss weiterhin durchgeführt werden, um die Gültigkeit des Modells zu überprüfen. Die Validierung wird als ein iterativer Korrekturprozess bezeichnet, indem sich die Modellgültigkeit für das spezielle Problem nachweisen lässt. Weiterhin ist dabei sicherzustellen, dass das Verhalten des Modells und des realen Systems identisch sind. Eine Primäraufgabe der Validierung ist die Eingabedaten zu überprüfen. Da viele Parameter der realen Systeme als stochastische Prozesse (z.B. Bearbeitungszeiten) bezeichnet werden, ist es notwendig, diese durch mathematische Verteilungen mit zulässiger Genauigkeit zu definieren.

Während der Durchführungsphase sind Simulationsabläufe zu planen, bei denen grundsätzlich die Systemkenngößen und Ablaufregeln variiert werden. Die Variie-

runge von Kenngrößenwerten muss vorher geplant werden. Bei der Simulation von Fließlinien eignet sich die sogenannte „One-by-One-Methode“, bei der jeweils nur eine Eingangskenngröße ausgewählt bzw. verändert wird, während alle anderen unveränderlich bleiben, vgl. (Krüger T. , 2000, S. 47). Eine Übersicht über Versuchsplanungsverfahren findet sich bei (Wang, 1995). Die Kenngrößenwerte der anderen Varianten können trotzdem automatisch durch die Software innerhalb eines Intervalls variiert werden. Das erfolgt i.d.R. bei der Modellierung stochastischer Ereignisse. Die stochastischen Werte einer Kenngröße werden durch sogenannte Zufallszahlen generiert. Dementsprechend lassen sich daraus auch schwankende Ergebnisse erzeugen. Um die Einflüsse von zufällig erzeugten extremen Werten zu umgehen, werden mehrere unabhängige Wiederholungen von Simulationsläufen durchgeführt. Das kann erreicht werden, wenn die Startwerte der Zufallszahlengeneratoren variiert werden. In der vorliegenden Arbeit wird berücksichtigt, dass keine bestimmte Zeitdauer für die Simulationsläufe vorgegeben ist, sondern die Erreichung des eingeschwungenen Zustandes der entsprechenden Größe i.d.R. das Simulationslaufende bestimmt. Weiterhin werden unabhängige Wiederholungen in jedem Simulationsexperiment durchgeführt.

Die Simulationsauswertung erfolgt erst nach Ende des Simulationslaufs. Simulationsergebnisse geben letztlich Aufschluss über das Systemverhalten. Die aus der Simulation gewonnenen Daten müssen analysiert, bewertet und interpretiert werden. In dem Auswertungsschritt wird nicht nur die Qualität der Ergebnisse, sondern auch ihre Interpretation überprüft und beurteilt. Durch diese lässt sich auf die Qualität der Rückschlüsse schließen. Bei der Interpretation werden die Simulationsergebnisse bearbeitet und in geeigneter Form aufbereitet. Demzufolge können sie als statistische Größen oder als auch Animation dargestellt werden. In vielen modernen Simulatoren werden die Ergebnisse automatisch gesammelt, statistisch ausgewertet und in geeigneten Tabellen und/oder Grafiken abgebildet. Allerdings lassen sie sich durch den Anwender auch über eine entsprechende Syntax in beliebiger Form anschaulich darstellen.

4.2.3 Fazit

Aufgrund der zunehmenden Komplexität von Produktionssystemen ist die Verwendung der Simulation in vielen Fällen erforderlich, wobei die Genauigkeit der Ergebnisse von großer Bedeutung ist. Die Vielzahl von Einflussgrößen, ihre Abhängigkeiten und die Berücksichtigung nebenläufiger Prozesse lassen die Entwicklung von deduktiven Modellen problematisch erscheinen. Mit Unterstützung

der Simulation kann man dagegen reale Bedingungen nachbilden und mit ausreichender Detaillierung visualisieren. Jedoch sind die Simulationsergebnisse stark von Inputgrößen abhängig, so dass i.d.R. nur singuläre Ergebnisse geliefert werden können. Werden zuverlässige allgemeine Erkenntnisse gefordert, so gilt die Verwendung analytischer Verfahren als die günstigere Lösung.

Je nach dem Ziel der Untersuchung und der zur Verfügung stehenden geeigneten Simulationsprogramme werden in der vorliegenden Arbeit beide Methoden genutzt.

4.3 Konzepte der Produktionsplanung und Steuerung bei Fließsystemen

Die Anordnung der Stationen nach dem Flussprinzip in der Fließfertigung erlaubt einen kontinuierlichen Materialfluss zwischen ihnen. Das bereits auf einer Station bearbeitete Erzeugnis wird zum nächsten Puffer oder zur nächsten Station weitertransportiert, solange ein freier Platz im Puffer vorhanden bzw. diese Station nicht belegt ist. Diese Regel des Materialflusses wird als Push-Prinzip bezeichnet. Die Erzeugnisweitergabe erscheint wenig kompliziert und ist mit geringem Steuerungsaufwand verbunden. Jedoch sind dies nicht die einzigen Regeln zur Planung und Steuerung von Fließsystemen. Bei Mehrprodukt-Fließfertigung müssen weiterhin in vielen Fällen die Losgröße, das Produktionsprogramm und die Reihenfolge geplant werden.

Im Allgemeinen wurden viele Konzepte entwickelt, welche in die meisten heutigen Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme (PPS-Systeme) integriert werden. Die PPS-Systeme beruhen auf dem Konzept MRP-II (Manufacturing Resource Planning), vgl. (Drexl, Fleischmann, Günther, Stadtler, & Tempelmeier, 1994). Die in den 80er und 90er Jahren entwickelten Erweiterungen der PPS-Systeme haben zur Enterprise Resource Planning (ERP) geführt, wobei der Fokus nicht nur auf der Planung des Produktionsbereiches eines Unternehmens liegt, sondern auf weiteren betrieblichen Bereichen wie z.B. Beschaffung, Vertrieb, Personalmanagement, Finanz- und Rechnungswesen etc. Zuvor wurde in den 80er Jahren die CIM-Konzeption (engl. Computer Integrated Manufacturing) entwickelt, in der Informationssysteme für betriebswirtschaftliche und technische Gebiete eines Unternehmens mit Unterstützung des Computers integriert werden.

Die weiteren Verbesserungen der ERP-Systeme, auch zur Abdeckung der gesamten Wertschöpfungskette haben zu APS-Systemen (Advanced Planning System) geführt. Dabei lassen sich die Geschäftsprozesse planen, analysieren und/oder simulieren, um integrierte Planung und Steuerung dieser Prozesse über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg zu erreichen. Ein Überblick über die traditionellen PPS-Systeme und alternative Konzepte findet sich in (Kurbel, 2005; Günther & Tempelmeier, 2007).

Im Folgenden werden JIT-, die (Optimized Production Technology) OPT-Konzepte und das Problem der Produktionsprogramm- bzw. Reihenfolgeplanung kurz dargestellt.

4.3.1 JIT-Konzept

Das JIT-Konzept basiert i.d.R. auf der Annahme, dass die Herstellung einer Produktmenge in einer Fertigungsstufe nur durchgeführt werden soll, wenn eine Nachfrage durch die nachgelagerte Fertigungsstufe bestätigt wird (Pull-Prinzip). Dabei sind die Bestandsmengen zwischen den Fertigungsstufen niedrig zu halten und die Fertigungsprozesse in allen Stufen synchronisiert durchzuführen. Die Bausteine des JIT-Konzepts lassen sich nach (Wildemann, 1990, S. 32) wie folgt zusammenfassen:

- Integrierte Informationsverarbeitung
- Fertigungssegmentierung
- Synchronisierte Beschaffung bzw. Produktion.

Das selbststeuernde Kanban-System ist ein wichtiges Instrument zur Verwirklichung der Regeln des JIT-Konzepts. Das Kanban-Prinzip wurde vom japanischen Automobilhersteller Toyota zur Unterstützung der Produktionsplanung- und Steuerung eines Materialflusses entworfen und später zu einem umfassenden Steuerungssystem ausgebaut. Kanban-Grundregeln helfen, Bestände zu reduzieren, sie auf einem niedrigen Niveau zu halten und den Aufwand für die Steuerung des Materialflusses zu mindern. Die Bestellvorgänge erfolgen dezentral mit Unterstützung so genannter Kanbans (Identifikationskarten), welche die Kanban-Behälter begleiten.

Die Bestandshöhe ist bei der Variantenfließfertigung abhängig von der kurzfristigen Produktionsprogrammplanung, welche die Aufgabe hat, die in der Fließlinie herzustellenden Erzeugnisse zeitlich und mengenmäßig abzustimmen. Diese dar-

gestellte Verteilung des Auftragsbestands über die Perioden ist vor allem bei der Marktfertigung und mit wenigen Optionen möglich. Je höher der Unterschied (Anzahl der Optionen) zwischen den Varianten ist, desto mehr Voraussetzungen entstehen, um das Produktionsprogramm zu bestimmen. Bei der Auftragsfertigung müssen weiterhin die Liefertermine im Rahmen der Programmplanung berücksichtigt werden. Für diesen Fall hat Boysen in seiner Dissertation ein Entscheidungsmodell bei Variantenfließfertigung entwickelt, (Boysen, 2005).

4.3.2 Engpassorientiertes OPT-Verfahren

Das OPT-Verfahren wurde maßgeblich durch E. M. Goldratt 1980 entwickelt, der die Hauptprinzipien der OPT in seinem Buch „The Goal“ dargestellt hat, vgl. (Goldratt & Cox, 1984). Obwohl das OPT-Konzept im Jahr 1982 in den amerikanischen Markt eingeführt wurde, sind aus kommerziellen Gründen gewisse Prinzipien des Konzepts nicht veröffentlicht worden, vgl. (Wiendahl, 1997; Burkhalter & Philippe, 2010; Buzacott, Corsten, Gössinger, & Schneider, 2010). Die Grundlagen dieses Konzepts basieren auf der Annahme, dass die Leistung des gesamten Fließsystems von seinen Engpässen abhängig ist. Aufgrund dieser Überlegung lassen sich die Systemkomponenten in Engpässe und Nicht-Engpässe aufteilen. Die Engpassstationen müssen möglichst vollständig ausgenutzt werden und deshalb sind sie zu jedem Zeitpunkt mit Materialien zu versorgen. Eine Verschwendung in einer Engpassstation ist meist eine Verschwendung für das gesamte Fließsystem. Der Versuch, die Auslastung von Nicht-Engpassstationen zu erhöhen, führt nicht unbedingt zur Erhöhung des Durchsatzes des gesamten Systems. Aus diesem Grund lässt sich auf verschiedene zusätzliche Investitionen verzichten, welche auf die Steigerung der Auslastungen der Nicht-Engpässe ausgerichtet sind.

Die Vorgehensschritte des OPT-Konzepts werden meist durch den Drum-Buffer-Rope-Ansatz (übersetzt: Trommel-Puffer-Seil)³⁴ dargestellt. Zunächst wird das Produktnetzwerk entsprechend der Abb. 4.8 erstellt. Die einzelnen Arbeitsgänge bzw. Stationen (sowie auch ihre Zwischenerzeugnisse) werden als Knoten und die Materialflüsse als Kanten bezeichnet. Die Engpässe sind durch die dunklen Rechtecke zu erkennen. Um die Engpässe zu vermeiden, wird versucht, die Ausführungszeiten der Arbeitsgänge in Engpassstationen zu verringern oder sogar einige dieser Arbeitsgänge den vorgelagerten Nicht-Engpassstationen zuzuord-

³⁴ Vgl. (Becker T., 2005, S. 45).

nen. Ist das nicht der Fall, wird das Produktnetzwerk in einen kritischen und unkritischen Teil getrennt. Zum kritischen Teil gehören alle Arbeitsgänge der Engpässe und darauffolgenden Arbeitsgänge, welche die in den Engpassstationen bereits behandelten Erzeugnisse weiter bearbeiten müssen.

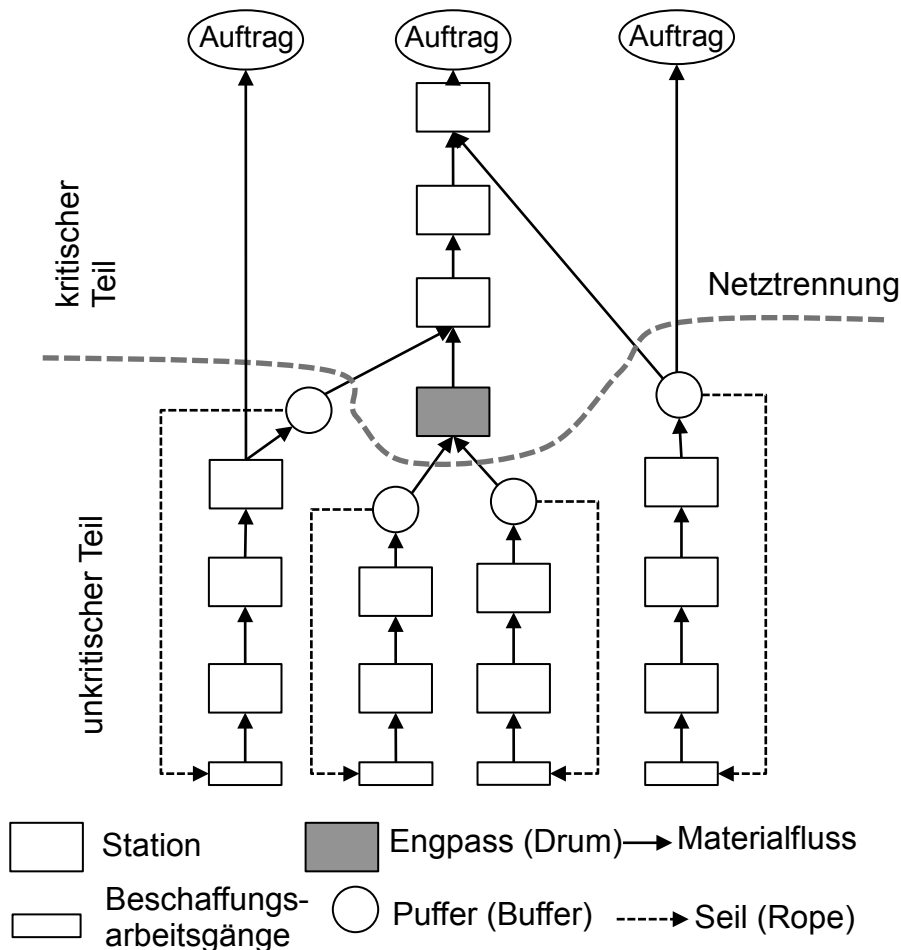


Abb. 4.8: Darstellung des kritischen und unkritischen Teils eines Produktnetzwerkes, in Anlehnung an (Corsten, 2004)

Es wird angestrebt, zunächst die Engpassstationen zu definieren und anschließend die Terminierung (Rückwärtsterminierung) der vorgelagerten Stationen durchzuführen (Drum-Aspekt). Um die Folgen von stochastischen Prozessen, die auf den Stationen im unkritischen Teil auftreten, zu vermeiden, werden Puffer an den Übergängen vom unkritischen Netzteil vorgesehen, wie in Abb. 4.8 dargestellt. Die Aufgabe dieser Puffer besteht darin, entsprechende Sicherheitsbestände zu gewährleisten. Dadurch werden die nachfolgenden Stationen immer mit Material versorgt (Buffer-Aspekt). Um die Pufferinhalte zu bestimmen, ist ein Informationsaustausch zwischen den Systemkomponenten erforderlich, so dass abhängig von Pufferinhalten der unkritische Netzteil rückwärts einzuplanen ist. Weiterhin sind die Freigabetermine an die Stationen im kritischen Netzteil ausgehend

von der Belegung der Engpässe zeitlich vorwärtsterminiert einzuplanen (Rope-Aspekt), vgl. vgl. (Corsten, 2004, S. 566; Küpper & Helber, 2004, S. 287). Beispiele für die Untersuchungen des OPT-Konzepts werden in (Dochnal, 1990; Ziser, 2007) dargestellt.

4.3.3 Reihenfolgeplanung

Das Problem der Reihenfolgeplanung in der Variantenfließfertigung wird grob im Rahmen der Beschreibung von Bearbeitungsschwankungen in (Domschke, Klein, & Armin, 1996) dargestellt. Hauptsächlich zielt hierbei die Reihenfolgeplanung auf die Verteilung der Variante auf die Reihenfolge, so dass unter Berücksichtigung der Taktzeit die Ausführungszeiten der nacheinander folgenden Varianten möglichst ausgeglichen werden können, d.h. es erfolgt eine Abwechslung von Varianten mit höheren und geringeren Arbeitsinhalten. Für diesen Zweck wurde in (Boysen, 2005) ein entsprechendes Entscheidungsmodell entwickelt. Jedoch ist die Durchführung der geplanten Reihenfolge mit zusätzlichen Kosten (Puffer-, Steuerungskosten etc.) verbunden.

4.3.4 Fazit

Die oben dargestellten Konzepte der Produktionsplanung und -steuerung zielen im Allgemeinen auf die Minderung der Zeitverluste, Erhöhung der Termintreue und Reduzierung von Lagerhaltungskosten. Die Erreichung dieser Ziele ist aber grundsätzlich von der Struktur des Fließsystems, der Verkettungsart, dem Spezialisierungsgrad und der Fertigungsart (Markt- oder Auftragsfertigung) abhängig. Beispielsweise lässt sich das JIT-Konzept bei Variantenfließfertigung im Fall einer Auftragsfertigung durch ein Produktionsprogramm nicht vollständig durchführen, da hier nicht nur die Kapazitäten, sondern auch die Liefertermine und Optionen zu beachten sind. Wird der Materialfluss bei konvergierender oder divergierender Struktur durch eine Engpassstation bestimmt, so wird dabei die Planung noch weiter verkompliziert. Das bereits veröffentlichte OPT-Verfahren bietet in diesem Fall kaum eine Hilfe an.

4.4 Entwicklungsorientierte Schwerpunkte

Im Rahmen der Gestaltung und des Betriebs von Fließfertigungssystemen wurde dargestellt, dass viele Planungsprobleme noch nicht abgeschlossen sind oder so-

gar nur wenig betrachtet werden. Außerdem ist die Optimierung der logistischen Kenngrößen immer vorteilhaft. Der Fokus lag hauptsächlich auf der Bewältigung interner Einflussgrößen, wie z.B. Stördauer und Bearbeitungszeitschwankungen durch die Entwicklung von Verfahren zur Fließbandabstimmung, Dimensionierung von Puffern oder auf der Optimierung von Instandhaltungsmaßnahmen. Es wird hier vor allem angestrebt, den Nutzungsgrad zu steigern. Planungsprobleme zur Bewältigung externer Einflussgrößen in der Fließfertigung, wie z.B. Schwankungen der Auftragsnachfrage oder Absatzänderungen, sind noch offen. Solche Fälle werden z.B. in (Krüger A. , 2004) umfassend dargestellt. Die Anpassungsfähigkeit eines Fließmontagesystems ist aber aufgrund der strengen Anordnung der Stationen, der bestimmten Taktzeit und der festgelegten Materialflussrichtungen begrenzt. Im Folgenden werden bestimmte Planungsprobleme, die vor allem bei Variantenfließfertigung auftreten, ausgewählt und weiterhin erläutert bzw. untersucht. Sie werden mithilfe der Strukturart definiert.

4.4.1 Entwicklung konvergierender und divergierender Strukturen

Es geht dabei um das Abtaktungs- bzw. Synchronisierungsproblem bei den konvergierenden und divergierenden Strukturen der Montage, vor allem im Fall Marktfertigung. Das Problem tritt auf, wenn die Leistungen von verketteten Fließlinien nicht vollständig abgestimmt werden. Das hat zur Folge, dass Zeitverluste und Bestände aus den Leistungsunterschieden entstehen. Je höher die Fertigungstiefe ist, desto schwieriger wird es, Kapazitäten bzw. Leistung der verbundenen Segmente abzustimmen und desto größer sind die Durchlaufzeiten und Bestände zu erwarten. Ursachen für das Problem lassen sich wie folgt darstellen:

- In der Konfigurationsphase:
 - Die Verfahren der Fließbandabstimmung konzentrieren sich grundsätzlich auf die serielle Struktur³⁵. Systemkenngrößen verbundener Fließlinien haben aber einen großen Einfluss auf die Leistung der Fließlinie, deren negative Wirkungen schwer bei der Berechnung der Taktzeit der Linie zu beurteilen sind. Entsteht ein Engpass im Produktnetzwerk, so wird der Materialfluss durch diesen Engpass bestimmt, der sich früher oder später im Produktnetzwerk befindet.

³⁵ Die Verfahren für die parallele Struktur und U-Form können als Ausnahmen bezeichnet werden.

- Die Berechnung der Taktzeit für jede Linie erfolgt i.d.R. durch drei Phasen, wie im Abs. 3.2 dargestellt wurde. Demzufolge kann aus individuellen Korrekturen der Taktzeiten von Fließlinien ein Abtaktungsproblem entstehen.
- Wenn die geplante Taktzeit einer Linie im Produktnetzwerk größer als die korrigierte Taktzeit ist, wird die Fertigung von Erzeugnissen in dieser Linie schneller als die Entsorgung durch die nachstehende Linie. Das geschieht z.B., wenn sich das Fließsystem aus einer Hauptlinie und vielen mit ihr verbundenen verflochtenen Linien zusammensetzt. Dabei mag sein, dass es einen großen Unterschied zwischen den zu erfüllenden Arbeitsmengen in diesen Linien im Vergleich zur Hauptlinie gibt.
- In der Betriebsphase: Auf der Grundlage der Fertigungstechnologie und des Automatisierungsgrads wirken sich die internen Einflussgrößen unterschiedlich auf die verketteten Fließlinien aus. Dementsprechend ergeben sich unterschiedliche Gesamtnutzungsgrade der Fließlinien und deshalb unterschiedliche Abweichungen der Linienleistungen

Ein spezieller Fall für die konvergierenden und divergierenden Strukturen ist die Nachbearbeitungsschleife, vgl. Abs. 2.6.2 bzw. 3.5. Fertigungsfehler treten stochastisch ein, d.h. es ist nicht häufig anzutreffen, dass nacheinander eine Vielzahl fehlerhafter Erzeugnisse bzw. Produkte in der Qualitätsstation entdeckt und in die Nebenlinie weitergegeben werden. Die anschließend in die Nebenlinie nachbearbeiteten Erzeugnisse müssen wiederum in der Hauptlinie bearbeitet werden. Die Ausschleusung und Zusammenführung von Erzeugnissen (Erzeugnisströmen) verursacht eine Destabilisierung der Fließbandabstimmung in der Hauptlinie. Weiterhin stellt die optimierte Konfiguration der Nebenlinie ein weiteres Planungsproblem dar, wobei vor allem über die Taktzeit bzw. die Stationsanzahl zu entscheiden ist. Zur Bestimmung der Taktzeiten von Nebenlinien (Nachbearbeitungslinien) findet sich keine Hilfe in der Fachliteratur.

Das Ziel der Untersuchung ist die Entwicklung einer Methode zur Optimierung der konvergierenden und/oder divergierenden Strukturen, so dass die Leistungsabstimmung der verketteten Linien in der Konfigurationsphase zu berücksichtigen und weiterhin die eventuell entstehenden Engpässe in der Betriebsphase zu bewältigen sind. Die Größen der Taktzeit und der Anzahl der Stationen pro Fließlinie sind nicht unabhängig von denselben Größen der verbundenen benachbarten Fließsysteme zu bestimmen. Die optimale Ermittlung dieser Größen ist der Schlüssel zur Prozessharmonisierung in den verketteten Fließsystemen. In der Betriebs-

phase sind Vorschläge zur Verbesserung des Gesamtnutzungsgrads und des Materialflusses zu erstellen.

4.4.2 Entwicklung paralleler Strukturen

Die Bestimmung der Taktzeiten von Fließlinien abhängig von der Jahresstückzahl entspricht nicht den realitätsnahen Randbedingungen, vgl. Abs. 3.2. Wie im Abs. 2.7.2 erläutert wurde, können aber die Aufträge unregelmäßig auf die Jahreszeit verteilt werden. Ist das der Fall, so ergibt sich eine unregelmäßige Belastung der Fließlinie, d.h. Über- und Unterkapazitäten entstehen. Das Problem tritt sowohl in der Marktfertigung wegen der Absatzveränderungen als auch in der Auftragsfertigung wegen der Nachfrageschwankungen auf. Die Fließmontagesysteme müssen so flexibel ausgestaltet werden, dass die Kapazitäten schnell auf die unvorhersehbaren Stückzahländerungen angepasst werden können bzw. darauf reagiert werden kann. Die Erhöhung der Systemflexibilität ist durch die Gestaltung der parallelen Struktur bzw. durch Redundanz möglich. Wie im Abs. 2.6.3 dargestellt wurde, können verschiedene positive Synergien zwischen den parallelen Stationen entstehen. Trotz der unterschiedlichen Vorteile der parallelen Struktur wurde sie lediglich bei Variantenfließfertigung in Betracht gezogen. Außerdem wurde die parallele Struktur kaum mit der Zielsetzung untersucht, die externen Einflussgrößen zu bewältigen.

Die Untersuchung konzentriert sich dabei auf die Vertiefung des Wissens zur wirtschaftlichen Gestaltung und zum Betrieb von parallelen Fließlinien. Weiterhin werden unter Berücksichtigung externer und interner Einflussgrößen Erkenntnisse zur Steigerung des Gesamtnutzungsgrades des Fließsystems mithilfe der Simulation gewonnen. In diesem Zusammenhang wird unter Berücksichtigung der logistischen Kenngrößen ein Vergleich der Wirtschaftlichkeit der Parallelisierung von Fließlinien durchgeführt.

4.4.3 Optimierung von Pufferkapazitäten

Aufgrund vieler Vorteile des Einsatzes von Puffern in Fließsystemen, insbesondere zur Erhöhung des Gesamtnutzungsgrads, wurde die Optimierung von Puffergrößen durch zahlreiche Veröffentlichungen betrachtet. Trotzdem fokussierten die Untersuchungen auf die seriellen und divergierenden Strukturen wie z.B. bei der Entwicklung von Warteschlangenmodellen, vgl. Abs. 4.2.1.1. Bei elastischer Verkettung befindet sich i.d.R. zwischen jeweils zwei nacheinander folgenden Statio-

nen ein Puffer. Je größer die Pufferkapazitäten sind, desto geringer sind die Verkettungsverluste, jedoch sind Pufferkosten und Kapitalbindung höher. Das Problem verschärft sich bei paralleler Struktur, wenn die Anzahl der Stationen bzw. Linien häufig verdoppelt werden müssen (vgl. das Modell von Zäpfel im Abs. 2.6.3.2). Dabei verdoppelt sich ebenso die Anzahl von Pufferanlagen.

Die Zielsetzung dabei ist, eine neue Methode zur optimierten Dimensionierung von Puffern in der parallelen Struktur zu entwickeln, so dass die Systemkenngößen zu verbessern und die Pufferkosten zu reduzieren sind.

5 Entwicklung der konvergierenden und divergierenden Strukturen von Fließsystemen

Ausgehend von einer Nachbearbeitungsschleife werden die konvergierenden und divergierenden Strukturen untersucht bzw. entwickelt. Die Beschreibung des Verhaltens solcher Systeme ist im Vergleich zur seriellen Struktur komplizierter und die Anzahl von Einflussgrößen höher. Daher ist die Suche nach optimierten Lösungen für die Stationsleistungen und den Materialfluss schwieriger. Aus diesem Grund wird zum Beginn dieser Untersuchung das optimale Systemverhalten definiert. Die Einflussgrößen und ihre Zusammenhänge werden analysiert. In weiteren Schritten lassen sich unterschiedliche Abweichungen von der optimalen Situation berücksichtigen.

5.1 Nachbearbeitungsschleifen

5.1.1 Untersuchungsmodell

Die allgemeine Struktur von Nachbearbeitungsschleifen, die in Abb. 2.8 dargestellt wurde, wird weiterhin untersucht und entwickelt. Eine solche Schleife entsteht, wenn für einen Teil des Materialstroms (fehlerhafte Teile) in einer Fließlinie eine Ausschleusung bzw. eine Zusammenführung vorzusehen ist. Dabei entstehen eine Hauptlinie mit größerem Materialstromanteil und eine Nebenlinie mit kleinerem Materialstromanteil. Zur Vereinfachung wird von deterministischen Bearbeitungszeiten und störungsfreien Stationen ausgegangen, so dass auf Puffer verzichtet werden kann. Die neue Struktur zeigt Abb. 5.1.

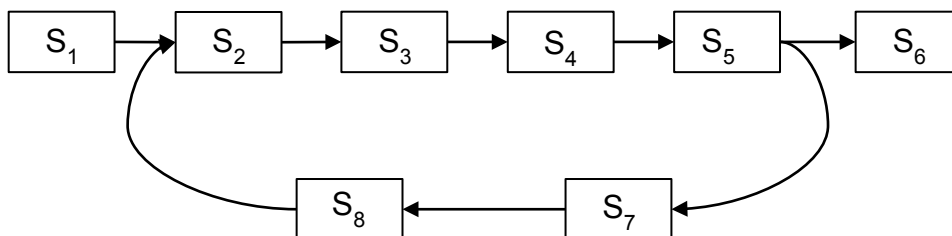


Abb. 5.1: Das Untersuchungsmodell der Nachbearbeitungsschleife

Das Fließsystem wird mit einer Qualitätsstation S_5 vorgesehen, in der die Erzeugnisqualität überprüft wird. Nach der Überprüfung werden die fehlerhaften Erzeug-

nisse aus der Hauptlinie entnommen und zu den Nachbearbeitungsstationen (Nebenlinie) weitergegeben. Die Hauptlinie besteht aus den folgenden Stationen S_1 , S_2 , S_3 , S_4 , S_5 bzw. S_6 . Die Nebenlinie beinhaltet die Stationen S_7 bzw. S_8 . In den Stationen S_1 und S_6 werden stets fehlerfreie Erzeugnisse gefertigt. Diese Stationen sind von der Schleife ausgeschlossen, um die anfallenden Kosten zu reduzieren. Je früher die Fehler entdeckt bzw. behandelt werden, desto geringer ist die Anzahl der Arbeitsgänge bzw. die Stationsanzahl in der Nebenlinie, vgl. (Helber, 1999, S. 163). Unter der Annahme, dass die Stationskapazitäten in der Hauptlinie bereits abgestimmt sind, verursacht die Aufteilung des Materialstroms eine Destabilisierung der Fließbandabstimmung. Folglich lassen sich die Stationen im Fließsystem nach ihrer Auslastung wie folgt unterscheiden:

- Sehr gering ausgelastete Stationen (S_7 , S_8): Sie liegen in der Nebenlinie.
- Voll ausgelastete Stationen (S_2 , S_3 , S_4)³⁶: Sie befinden sich in der Hauptlinie und gehören zugleich zur Schleife. Zusätzlich zu ihren ursprünglichen Aufgaben müssen sie die aus der Nebenlinie kommenden Erzeugnisse nochmals bearbeiten. Diese Stationen gelten als Engpass und bilden zusammen ein sogenanntes Engpasssegment³⁷.
- Nicht voll ausgelastete Stationen (S_1 , S_6): Sie befinden sich in der Hauptlinie und gehören nicht zur Schleife. Je größer die Anzahl fehlerhafter Erzeugnisse ist, desto größer ist der Anteil nicht genutzter Kapazität (Leistungsverluste) in den Stationen S_1 und S_6 .

Da es keine spezielle Methode zur Gestaltung von Nebenlinien oder zur Abstimmung ihrer Leistung mit der Hauptlinie gibt, wird zur Vereinfachung unterstellt, dass die Bearbeitungszeiten der Stationen S_7 und S_8 den Bearbeitungszeiten der sich in der Hauptlinie befindenden Stationen gleichen. Diese Annahme entspricht vielen in der Literatur für solche Fließsysteme genannten Untersuchungen, z.B. bei (Helber, 1999; Li, 2004). Diese Annahme hat keinen Einfluss auf die weitere Vorgehensweise.

Unter Berücksichtigung der im Abs. 2.6.4 dargestellten Definition des Segments wird das Untersuchungsmodell in vier Segmente unterteilt. Die Abb. 5.2 zeigt deutlich, dass die Vernetzungselemente das System in vier Segmente mit unterschiedlicher Stationsanzahl bzw. -leistungen unterteilt. Die Leistung des Segments 1 bzw. 3 wird durch den Strom³⁸ λ_1 bzw. λ_3 ($\lambda_1 = \lambda_3$) bestimmt. Das Engpasssegment

³⁶ Zur Vereinfachung geht man davon aus, dass die Qualitätsstation S_5 keinen Engpass darstellt.

³⁷ Der Begriff Segment wurde im Abs. 2.6.4 definiert.

³⁸ In den folgenden Abschnitten wird der Begriff „Ankunftsrate“ anstatt „Strom“ verwendet.

wird als Segment 2 bezeichnet mit dem Strom λ_2 . Die Nebenlinie wird als Segment 4 bezeichnet mit dem Strom λ_4 .

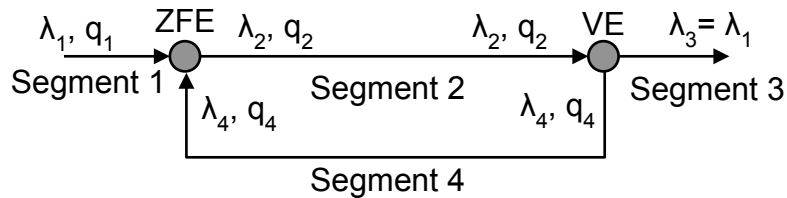


Abb. 5.2: Darstellung der Erzeugnisströme vor und nach den Verzweigungs- (VE) und Zusammenführungselementen (ZFE)

Da Fehler zufällig bei den Erzeugnissen auftreten, wird der Weitertransport der überprüften Erzeugnisse in Richtung der Station S_6 oder der Nebenlinie als stochastisch bezeichnet. Dementsprechend kommen die Erzeugnisse zur Station S_2 aus zwei Richtungen, S_1 und S_8 , auch stochastisch. An dieser Stelle lassen sich die Erzeugnisströme λ vor und nach der Verzweigung bzw. Zusammenführung mithilfe der Erzeugnisanteile q nach den Formeln (4.30)-(4.33) berechnen. Der Erzeugnisanteil q_4 (Anteil fehlerhafter Erzeugnisse) lässt sich als das Verhältnis aus der Anzahl der entdeckten fehlerhaften und der gesamten Anzahl der geprüften Erzeugnisse in einem bestimmten Zeitraum definieren. Damit die eventuellen Schlüsse aus der Untersuchung übertragbar sind, sind weitere Bedingungen zu definieren:

- Das System wird isoliert betrachtet.
- Es sind keine Zuordnungsrestriktionen bei der Abstimmung der Stationsleistung zu berücksichtigen.
- Das System bildet das Verhalten der oben dargestellten Nachbearbeitungsschleife nach.
- Es ist keine Prioritätsregel bei der Bearbeitung der von den Stationen S_1 und S_8 kommenden Erzeugnisse in der Station S_2 zu beachten.

5.1.2 Entwicklung eines Optimierungsverfahrens

Unter Bezug auf das in Abb. 5.1 gezeigte Untersuchungsmodell werden systematische Teilschritte³⁹ dargestellt, die zur Beschreibung bzw. Optimierung des Systemverhaltens von Nachbearbeitungsschleifen führen. Diese Entwicklungsschritte werden in Abb. 5.3 zusammengefasst.

³⁹ Sie werden in Analogie zu den allgemeinen in (Ostertag, 1996) entwickelten Schritten zur Optimierung technischer Systeme dargestellt.



Abb. 5.3: Systematische Vorgehensweise zur Optimierung von Nachbearbeitungsschleifen

Im ersten Schritt (Beschreibung der Aufgabenstellung) wird das Problem hinreichend beschrieben und die Primärziele der Optimierung definiert. Das Hauptproblem lässt sich in zwei Teile gliedern. Einerseits gibt es die Entstehung des Engpasses im Segment 2 und dadurch die Reduzierung der Auslastungen der Stationen S_1 und S_6 . Andererseits weisen die Stationen in der Nebenlinie immer niedrige Auslastungen auf. Das Ziel ist es, den Engpass zu beheben bzw. die Auslastungen der Stationen in den Segmenten 1, 3 und 4 zu erhöhen. Die Lösung orientiert sich entweder auf die Produktionsbeschleunigung im Segment 2 oder auf die Produktionsverlangsamung in den Segmenten 1 und 3. Um allerdings die Auslastung im Segment 4 zu erhöhen, müssen die Stationsgeschwindigkeiten verringert werden. Im Allgemeinen fokussiert sich der Lösungsansatz auf die Berechnung der optimalen Taktzeiten der Segmente.

Im zweiten Schritt (Aufstellung der Zielfunktionen) geht es um eine Beschreibung des Idealverhaltens und der davon abweichenden Alternativen. Anschließend sollten Teilziele erfasst und bewertet werden. In der idealen Situation sind alle Stationen im System 100 % ausgelastet. Das heißt, die Stationen müssen weder

auf Erzeugnisse warten (keine Wartezeiten) noch werden sie durch die Belegung der direkten Nachfolger blockiert (keine Blockierzeiten). Dementsprechend lässt sich das erste Teilziel so definieren, dass ein Ausgleich der Stationsleistungen zu erreichen ist. Hierunter muss vor allem verstanden werden, dass die Stationen mit unterschiedlichen Kapazitäten zu 100 % ausgelastet werden. Der Unterschied zwischen Stationsauslastungen in den Haupt- und Nebenlinien kennzeichnet die erste Abweichung von diesem Idealverhalten. Der Auslastungszustand einer Station in der Nebenlinie ist vor allem vom Anteil fehlerhafter Erzeugnisse abhängig. Diese Überlegung sollte zur Definition des zweiten Teilziels führen, so dass die Stationsgrößen (zugeordnete Arbeitsmenge) abhängig vom Erzeugnissanteil zu bestimmen sind. In einem weiteren Teilziel sollte die Weitergabe von Erzeugnissen beschrieben werden, wobei die Transportzeiten bzw. -kosten zu berücksichtigen sind. Eine weitere Abweichung ergibt sich, wenn die Stationsgröße nicht geändert werden darf, obwohl die Station nie voll belegt wird. Das Problem tritt auf, wenn z.B. eine Zuordnungsrestriktion die Abstimmung von Stationsleistungen einschränkt. Eine weitere Abweichung ist die Schwankung von Bearbeitungszeiten oder die Entstehung von Störungen. Demzufolge variieren Bearbeitungszeiten bzw. Zwischenankunftszeiten. Weiterhin lassen sich die Ankunftsrate λ und Bearbeitungsrate μ verändern. Das Teilziel⁴⁰ ist dabei, erforderliche Pufferplätze zwischen den Stationen vorzusehen und ihre Größen optimal zu bestimmen. Des Weiteren stellt sich die Frage, welche Transportmethode anzuwenden ist: die Benutzung von Werkstückträgern mit einzelnen bzw. mehreren kleinen Erzeugnissen oder das Transportieren von einzelnen Erzeugnissen.

Im dritten Schritt (Auswahl entscheidender Einflussgrößen) werden die Einflusskennzahlen definiert und nur diejenigen, die auf die oben beschriebenen Teilziele großen Einfluss haben, ausgewählt. Eine ausführliche Darstellung der Aufgabenstellung und Teilziele vereinfacht i.d.R. die Bestimmung der entscheidenden Parameter. Der Ausgleich von Stationsleistungen kann nicht erreicht werden, ohne die Bearbeitungszeiten von Stationen anzupassen. Somit werden die Bearbeitungszeiten als der erste entscheidende Parameter ausgewählt. Dieser Parameter ist aber eng mit der Taktzeit des Segments verbunden. Sein Wert wird generell mithilfe des Verfahrens der Fließbandabstimmung ermittelt. Auf diese Weise lässt sich die Taktzeit als der zweite entscheidende Parameter definieren. Außerdem beruht die Bestimmung der Stationsgröße auf den abgestimmten Bearbeitungszeiten. Die Auslastung einer Station ist grundsätzlich von der Bearbeitungszeit und

⁴⁰ Diese Situation wurde umfassend bei (Helber, 1999) behandelt.

dem Erzeugnisanteil abhängig, dessen Wert i.d.R. den Anteil der zu bearbeitenden Erzeugnisse im bestimmten Zeitraum angibt. Daher lässt sich der Erzeugnisanteil als der dritte entscheidende Parameter bezeichnen. Aufgrund der Variierung der Bearbeitungszeiten von benachbarten Stationen lassen sich noch zwei entscheidende Parameter, λ und μ , erkennen.

Die Suche nach Einflusskenngößen sollte gleichzeitig mit einer Auswahl existierender geeigneter Optimierungsverfahren einhergehen. Der Zusammenhang zwischen dem dritten und vierten Schritt ist in Abb. 5.3 durch eine Rückkopplung angegeben. Unter Bezugnahme auf das oben dargestellte Beispiel sind analytische Methoden geeignet, wobei nur maßgebliche Kenngößen zu berücksichtigen sind. Je nach der Kompliziertheit der Aufgabenstellungen lässt sich eine Kombination unterschiedlicher analytischer Methoden benutzen. Im Vergleich dazu ist die Simulation als Optimierungsmethode zeitlich und finanziell aufwändiger. Das Verhalten des Nachbearbeitungsschleifensystems wird in diesem Kapitel mit weiteren existierenden analytischen Modellen beschrieben. In Anlehnung an das dargestellte Verfahren im Bereich des nichtlinearen Materialflusses, vgl. Abs. 4.2.1.4, und die Auslegung hydraulischer Rohre, wird ein neues Verfahren entwickelt.

5.1.2.1 Hydraulische Analogie

Das Verhalten von Fließsystemen wurde in vielen Fachbüchern mit hydraulischen Systemen verglichen. In diesem Zusammenhang wurden Modelle wie z.B. das Trichtermodell bzw. das Kontinuierliche Materialfluss-Linie-Modell (engl. continuous-material flow line model), vgl. (Wiendahl, 1997; Helber, 1999, S. 165) entwickelt. In Anlehnung an das in Abb. 5.1 dargestellte Untersuchungsmodell lässt sich im Folgenden ein hydraulisches System modellieren. Man geht davon aus, dass die Segmente als Rohre bezeichnet werden und die diskreten Erzeugnisse wie Flüssigkeit durch sie fließen. Die Vernetzungselemente fungieren als Ventile oder Pumpen, die zur Förderung des inkompressiblen Mediums zum nächsten Segment dienen. Gemäß dieser Vorstellung werden die Erzeugnisse kontinuierlich an den Stationen bearbeitet, vgl. (Helber & Mehrrens, 2003). In Abb. 5.4 wird angenommen, dass die Erzeugnisse⁴¹ im Volumenstrom V_s verschmelzen. Somit können die Rohre durch zwei Parameter charakterisiert werden:

- Die Querschnittfläche des Rohrs (Q_{sf})
- Der Volumenstrom (V_s)

⁴¹ Ausgehend von gleichem Volumen der Erzeugnisse.

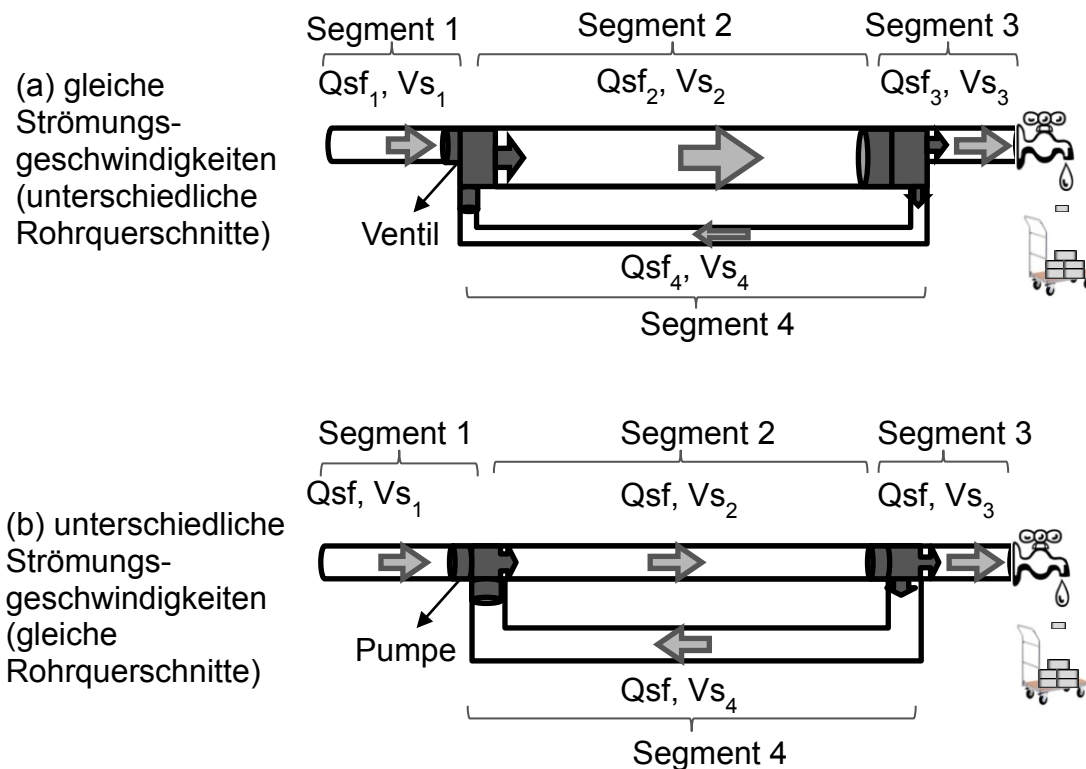


Abb. 5.4: Darstellung der Fließlinien als hydraulische Rohre und Vernetzungselemente als Ventile oder Pumpen

Wenn das flüssige Medium kontinuierlich und gleichzeitig vom Segment 2 in Richtung Segment 3 und 4 fließt, lassen sich die Formeln des Volumenstroms V_s in der Hydraulik nutzen, vgl. (Wossog, 2003):

$$V_s = \frac{V_o}{T} = U \cdot Q_{sf} \quad (5.1)$$

mit V_o : Volumen (z.B. cm^3) T : Die Zeitdauer der Strömung (z.B. s), U : Die Strömungsgeschwindigkeit (cm/s)

Würden die Vernetzungselemente als Ventile bezeichnet, so sind die Q_{sf} der Rohre proportional mit dem Volumenstrom auszulegen. Dabei wird angenommen, dass die Druckverluste in den Rohren vernachlässigbar und die Strömungsgeschwindigkeiten konstant sind. Dementsprechend resultieren daraus vier Werte von Volumenströmen, vgl. Abb. 5.4. Der Volumenstrom im Segment 2 gleicht der Summe von Volumenstrom des Segments 1 und des Segments 4, oder der Summe der Volumenströme der Segmente 3 und 4. Die Werte der Volumenströme entsprechen der flüssigen Medienmenge, die Anzahl bzw. die Anteile der

fließenden Erzeugnisse in jedem Segment q , so dass sich die folgenden Zusammenhänge bestimmen lassen:

$$Vs_2 = Vs_1 + Vs_4 = Vs_3 + Vs_4 \quad (5.2)$$

$$Vs_1 = Vs_3 = Vs_2 \cdot q_1 = Vs_2 \cdot q_3 \quad (5.3)$$

$$Vs_4 = Vs_2 \cdot q_4 \quad (5.4)$$

Mit Berücksichtigung der Annahme der konstanten Strömungsgeschwindigkeiten folgen die Formeln:

$$Qsf_2 = Qsf_1 + Qsf_4 = Qsf_3 + Qsf_4 \quad (5.5)$$

$$Qsf_1 = Qsf_3 = Qsf_2 \cdot q_1 = Qsf_2 \cdot q_3 \quad (5.6)$$

$$Qsf_4 = Qsf_2 \cdot q_4 \quad (5.7)$$

Würden die Vernetzungselemente als Pumpen bezeichnet, durch die die Strömungsgeschwindigkeiten variiert werden können, so ergeben sich unter der Annahme der konstanten Qsf die folgenden Formeln:

$$U_2 = U_1 + U_4 = U_3 + U_4 \quad (5.8)$$

$$U_1 = U_3 = U_2 \cdot q_1 = U \cdot q_3 \quad (5.9)$$

$$U_4 = U_2 \cdot q_4 \quad (5.10)$$

In Anlehnung an diese Überlegungen, erkennt man, dass die Strömungsgeschwindigkeit im hydraulischen System der Produktionsgeschwindigkeit im Fließsystem entspricht. Auf diese Weise ist die Produktionsgeschwindigkeit in einer Linie proportional mit den Erzeugnisanteilen. Das heißt, die Input- und Output-Stationen S_1 und S_6 werden nur voll ausgelastet, wenn die Produktionsgeschwindigkeit im Segment 2 dementsprechend erhöht wird. Das lässt sich erreichen, wenn die Taktzeit in diesem Segment verkleinert bzw. die Stationsanzahl erhöht werden. Im Gegenteil ist die Taktzeit im Segment 4 zu erhöhen und die Stationsanzahl zu reduzieren.

5.1.2.2 Optimierter nichtlinearer Materialfluss

Um die ideale Situation für das dargestellte Nachbearbeitungsschleifensystem zu erläutern, sind zwei Fälle zu berücksichtigen. Einerseits ist das ideale Verhalten in dem jeweiligen Segment mit einer linearen Stationsanordnung und andererseits zwischen den unmittelbar verbundenen Segmenten (nichtlineare Anordnung) zu beschreiben.

Im ersten Fall ist die lineare Anordnung zu betrachten. Ausgehend von der Annahme, dass die Stationen zu 100 % ausgelastet sind, sind der Output und Input aller Stationen gleich. Sobald ein Erzeugnis in einer Station bearbeitet wird, wird es ohne Verzögerung zum Nachfolger weitergegeben, d.h. Alle Stationen im Segment beginnen bzw. beenden die Bearbeitung von Erzeugnissen gleichzeitig. Wird die Abweichung vom idealen Fall berücksichtigt, wobei stochastische Prozesse auf den Stationen auftreten, so lässt sich eine optimierte Situation definieren, in der die Bearbeitungs- und Ankunftsrate gleich sind. Die Aussage lässt sich durch die Formel (5.11) ausdrücken:

$$\lambda = \mu = \frac{1}{T_k} \quad (5.11)$$

Die Bearbeitungsrate μ stellt die mittlere Anzahl der in einer Station pro ZE bearbeiteten Erzeugnisse dar und gleicht dem Kehrwert der Bearbeitungszeit dieser Station (Stationstaktzeit T_k). Weiterhin ist anzumerken, dass die Taktzeiten der Stationen und die Taktzeit des entsprechenden Segments gleich sind.

An dieser Stelle lassen sich die in Abb. 5.2 dargestellten Ströme durch die entsprechenden Bearbeitungsraten ersetzen. Dadurch ergibt sich Abb. 5.5.

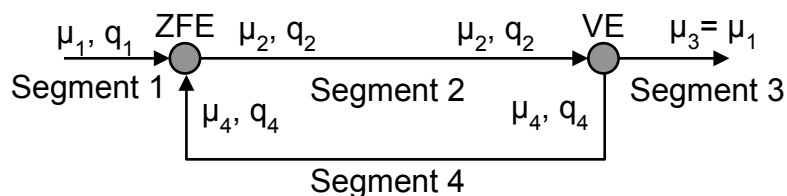


Abb. 5.5: Austausch von Strömen mit Bearbeitungsraten der Abb. 5.2

Im zweiten Fall ist ein optimiertes Verhalten an den Vernetzungselemente zu berücksichtigen. Betrachtet man die Abb. 4.7 und Abb. 5.5, so kann man dabei die Formeln (4.30)-(4.33) erneuert wie folgt schreiben:

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_4} = \frac{1}{T_3} + \frac{1}{T_4} \quad (5.12)$$

$$\frac{1}{T_1} = \frac{1}{T_3} = \frac{1}{T_2} \cdot q_1 \quad (5.13)$$

$$\frac{1}{T_4} = \frac{1}{T_2} \cdot q_4 = \frac{1}{T_2} \cdot (1 - q_1) \quad (5.14)$$

Verbindet das Zusammenführungselement i-Eingänge (Segmente) mit nur einem Ausgang (Segment), vgl. Abb. 5.6.a, bspw. im Fall einer Nachbearbeitungsline für mehrere gleichartig parallele Fließlinien, so lassen sich die Soll-Taktzeiten der Segmente im Allgemeinen durch die folgenden Formeln berechnen⁴².

$$q = q_1 + q_2 + \dots + q_i \quad (5.15)$$

$$\frac{1}{C_{soll}} = \frac{1}{C_{soll1}} + \frac{1}{C_{soll2}} + \dots + \frac{1}{C_{soll i}} \quad (5.16)$$

$$\frac{1}{C_{soll1}} = \frac{1}{C_{soll}} \cdot q_1 = \frac{1}{C_{soll}} \cdot (q - q_2 - q_3 - \dots - q_i) \quad (5.17)$$

$$\frac{1}{C_{soll2}} = \frac{1}{C_{soll}} \cdot q_2 = \frac{1}{C_{soll}} \cdot (q - q_1 - q_3 - \dots - q_i) \quad (5.18)$$

$$\frac{1}{C_{soll i}} = \frac{1}{C_{soll}} \cdot q_i = \frac{1}{C_{soll}} \cdot (q - q_1 - q_2 - \dots - q_{i-1}) \quad (5.19)$$

Diese Formeln werden in der vorliegenden Arbeit als Leistungsformeln bezeichnet. Durch die Ersetzung des Symbols i durch j in den Formeln (5.15)-(5.19) ergeben sich die entsprechenden Formeln am Verzweigungselement, das in Abb. 5.6.b dargestellt wird.

⁴² Dabei wird T_k in den Formeln (5.12)-(5.14) durch C_{soll} ersetzt.

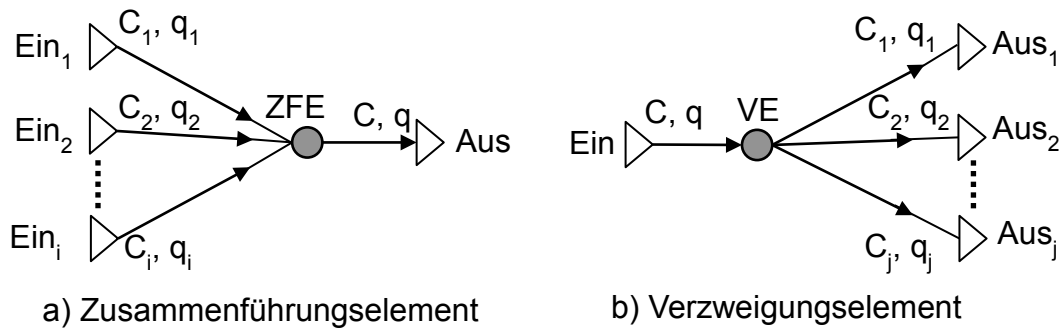


Abb. 5.6: a) Zusammenführungselement mit mehreren Eingängen (Ein) und nur einem Ausgang (Aus). b) Verzweigungselement mit mehreren Ausgängen und nur einem Eingang

Demgegenüber können diese Formeln nicht verwendet werden, wenn die Ströme an beiden Seiten des Zusammenfassungs- oder Verzweigungselements nicht nach der Formel (4.30) berechnet werden können. Diese Situationen trifft man bei Montage- oder Demontagestationen an, vgl. Abb. 5.7.

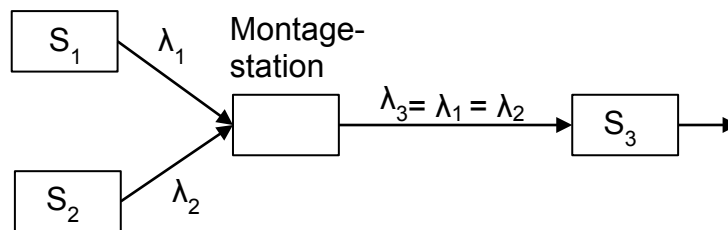


Abb. 5.7: Erzeugnisströme bei der Montagestation

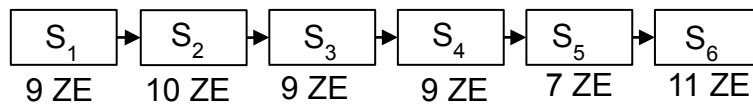
Stattdessen lässt sich hierbei die folgende Gleichung schreiben, wenn jeweils ein Erzeugnis aus den Stationen S_1 und S_2 in der Montagestation zusammengefasst werden, so dass daraus nur ein Erzeugnis resultiert.

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 \quad (5.20)$$

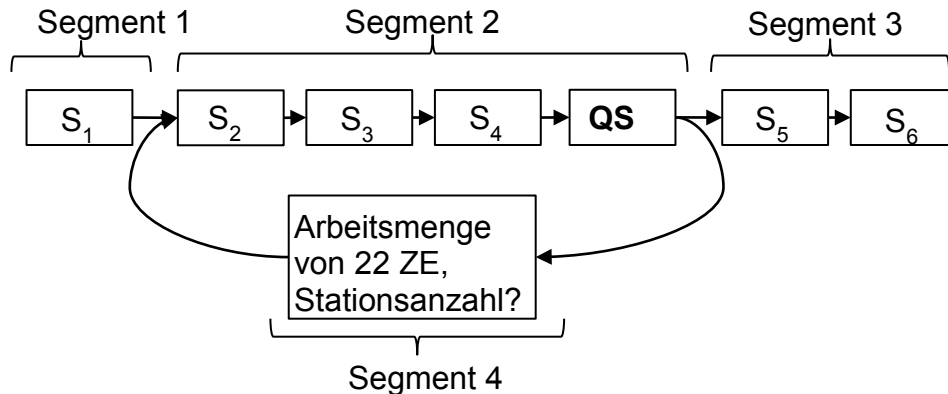
Beispiel C

Zur Anwendung der zuvor entwickelten Formeln im Fall einer Nachbearbeitungsschleife wird das Beispiel B nochmals betrachtet, wobei die Arbeitsgänge des in Abb. 3.5 dargestellten Vorranggraphen auf 6 Stationen verteilt werden. Dabei ist die Taktzeit von 11 ZE zu erreichen. Die Taktzeiten der Stationen zeigen die Werte des Parameters $t(S_k) = T_k$ (vgl. Tab. 3.3), die weiterhin unter den Stationen in Abb. 5.8 dargestellt werden.

a) Struktur der Fließlinie ohne Qualitätsstation und ohne Nachbearbeitung



b) Hinzufügung einer Qualitätsstation (QS) bzw. die angenommene Arbeitsmenge der Nachbearbeitung



c) optimierte Konfiguration

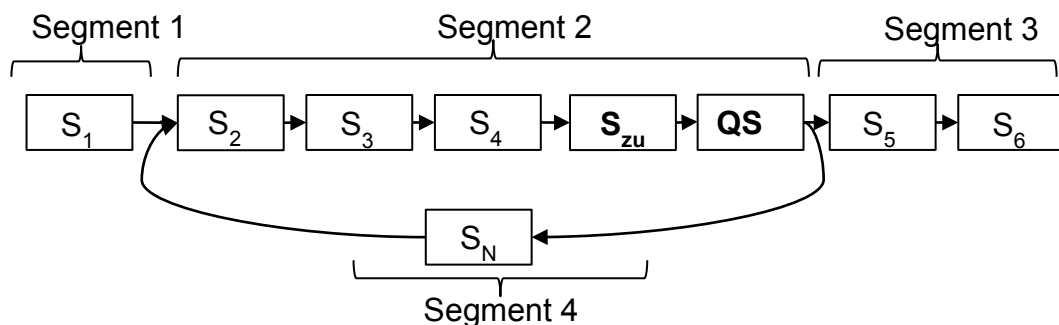


Abb. 5.8: Darstellung der Struktur der sich ergebenden Nachbearbeitungsschleife

Es wird angenommen, dass fehlerhafte Erzeugnisse in den Stationen S_2 , S_3 und S_4 entstehen und deshalb eine Nachbearbeitungsschleife zu planen ist. Deswegen wird eine Qualitätsstation QS nach der Station S_4 vorgesehen. Ihre Bearbeitungszeit muss die Annahme erfüllen, dass sie keinen Engpass bildet. Weiterhin geht man von einer mittleren Arbeitsmenge⁴³ von 22 ZE für die Nachbearbeitung aus, vgl. Abb. 5.8.b. Der Anteil der fehlerhaften Erzeugnisse beträgt z.B. $q_4 = 20\%$. Auf diese Weise würden die Stationen S_2 , S_3 und S_4 jeweils bis auf 120 % belastet, d.h. sie bilden ein Engpasssegment. Das Primärziel ist dabei, den Engpass zu entlasten. Das erfolgt in der Konfigurationsphase, wobei die optimale Stationsanzahl und Taktzeiten zu bestimmen sind.

⁴³ Zur Vereinfachung wird hier auf weitere Detaillierungen, wie z.B. die Anzahl und Bearbeitungszeiten der Arbeitsgänge bzw. den Vorranggraphen in der Nachbearbeitung, verzichtet.

Zur Lösung dieses Planungsproblems wird zunächst das Fließsystem in vier Segmente eingeteilt. Zweitens sind mithilfe der entsprechenden Leistungsformeln die Soll-Taktzeiten der Segmente C_{soll} zu berechnen. In Anlehnung an die Taktzeit des Output-Segments (Segment 3) $C_{\text{soll}3} = 11$ ZE sind die Taktzeiten $C_{\text{soll}1}$, $C_{\text{soll}2}$ und $C_{\text{soll}4}$ zu bestimmen. Wenn die (im Beispiel B) aus der Fließbandabstimmung resultierende Taktzeit⁴⁴ des Segments 3 ($C_{\text{abst}3}$) kleiner als die Soll-Taktzeit $C_{\text{soll}3}$ ist, müssen in diesem Fall die Taktzeiten der verbundenen Segmente in Anlehnung an $C_{\text{soll}3}$ und nicht an die eventuell neue Taktzeit $C_{\text{abst}3}$ berechnet werden. Durch die Einhaltung dieser Regel wird eine minimale Stationsanzahl im Fließsystem gewährleistet. Wäre $C_{\text{abst}3} > C_{\text{soll}3}$, so bildet das Segment 3 einen Engpass. In diesem Fall werden aus gleichem Grund die C_{soll} verbundener Segmente in Abhängigkeit von $C_{\text{abst}3}$ und nicht $C_{\text{soll}3}$ ermittelt.

Basierend auf den entsprechenden Leistungsformeln lassen sich die folgenden Formeln schreiben:

$$\frac{1}{C_{\text{soll}2}} = \frac{1}{C_{\text{soll}3}} + \frac{1}{C_{\text{soll}4}} = \frac{1}{11} + \frac{1}{C_{\text{soll}4}} \quad (5.21)$$

$$\frac{1}{C_{\text{soll}4}} = q_4 \cdot \frac{1}{C_{\text{soll}2}} = 0,2 \cdot \frac{1}{C_{\text{soll}2}} \quad (5.22)$$

Die Lösung für die zwei Gleichungen (5.21) und (5.22) mit den zwei Unbekannten $C_{\text{soll}2}$, $C_{\text{soll}4}$ ist: $C_{\text{soll}2} = 8,8 \approx 9$ ZE, $C_{\text{soll}4} = 44$ ZE

Anhand dieser Soll-Taktzeiten ist eine Fließbandabstimmung im Segment 4 und erneut im Segment 2 durchzuführen.

Es ist eindeutig, dass sich im Segment 4 nur eine Station S_N mit einer Taktzeit $C_{\text{abst}4} = T_N = 22$ ZE ergibt. Das Ergebnis ändert sich nicht, solange die Arbeitsmenge der Nachbearbeitung gleich oder kleiner als 44 ZE. Eine zulässige⁴⁵ Lösung für das Segment 2 stellt die Tab. 5.1 dar, wobei sich die Stationsanzahl um eins erhöht. Die neue Station wird als S_{zu} bezeichnet, vgl. Abb. 5.8.c.

⁴⁴ Das Symbol C_{abst} wird benutzt, um die aus der Fließbandabstimmung resultierende Taktzeit zu bezeichnen.

⁴⁵ Da das Beispiel C auf die Verdeutlichung der entwickelten Methode grundsätzlich abzielt, ist hier die Findung der perfekten Lösung nicht nötig.

Tab. 5.1: Darstellung einer zulässigen Lösung⁴⁶ zur erneuten Abstimmung des Segments 2

$\begin{matrix} S_k \\ T_{kv} \end{matrix}$	$S_2 = \{1\}$	$S_3 = \{3,4\}$	$S_4 = \{5,7\}$	$S_{zu} = \{6,9,10\}$	T_v
T_{k1}	6	9	9	6	7,5
T_{k2}	5	11	4	6	6,5
T_{k3}	8	5	5	6	6
$t(S_k)$	6	9	7	6	

In Anlehnung an die oben erwähnte Regel wird C_{soll1} in Abhängig von den bereits bekannten Werten C_{soll2} , C_{soll4} berechnet. Es gilt das Folgende:

$$\frac{1}{C_{soll2}} = \frac{1}{C_{soll1}} + \frac{1}{C_{soll4}} \rightarrow \frac{1}{9} = \frac{1}{C_{soll1}} + \frac{1}{44} \rightarrow C_{soll1} = 11,31 \approx 11 \text{ ZE}$$

Die S_1 ist die einzige Station in dem Segment 1, deren Bearbeitungszeit $C_{abst1} = 9$ ZE beträgt. Ihre gewünschte Taktzeit C_{soll1} entspricht aber 11 ZE. Man versucht, durch ein Fließbandabstimmungsverfahren diese Taktzeit zu erhöhen. Jedoch ist die Reduzierung der Stationsanzahl zur Erhöhung der Taktzeit in diesem Segment unmöglich. Die Taktzeit C_{abst1} ist kleiner als die C_{soll1} , d.h. dieses Segment bildet keinen Engpass. Dadurch wird der Engpass in der Hauptlinie verhindert. An dieser Stelle werden die Stations- bzw. Segmentleistungen im Fließsystem abgestimmt.

Der Unterschied zwischen den berechneten Taktzeiten C_{soll} und den sich ergebenden C_{abst} spiegelt den Wert der Auslastungsgrade der Segmente wider. Betrachtet man die Segmentauslastungen, so erkennt man, dass die Segmente 1 und 4 am geringsten ausgelastet sind. Im Segment 1 arbeitet die Station S_1 schneller als beim optimalen Wert. Aufgrund des Mangels an zu bearbeitenden Erzeugnisse im Segment 4 wird die Station S_N nur zu ca. 50 % ausgelastet. Dabei wird der Auslastungsgrad (ρ_s) eines Segments durch die folgende Formel berechnet:

$$\rho_s = \frac{C_{abst}}{C_{soll}} \quad (5.23)$$

Die Auslastungsgrade der Segmente haben jedoch Wirkungen auf die Planung der zwischen ihnen befindlichen Materialflusssysteme. Unter der Annahme, dass die Weitergabe von Erzeugnissen im jeweiligen Segment kontinuierlich nach dem

⁴⁶ Die Indizes 1,2, und 3 bei den Taktzeiten T_k beziehen sich auf die im Beispiel angedachte Montage unterschiedlicher Erzeugnisvarianten.

Push-Prinzip erfolgt, lässt sich ρ_s Informationen zur Planung der Materialflusssysteme zwischen den Segmenten anbieten. Die Werte von ρ_s reflektieren ebenso die Auslastungen des jeweiligen Fördersystems, das das Segment mit Erzeugnissen versorgt bzw. die bereits im Segment bearbeiteten Erzeugnisse entsorgt. Die Planung von Fördersystemen setzt vor allem voraus, dass sie keine Engpässe bilden. Weiterhin spielen die anfallenden Kosten eine Rolle bei den Entscheidungen über die Art der Förder Elemente (z.B. stetig, unstetig, Werkstückträger etc.). Damit kein Engpass im Materialflusssystem entsteht, lässt sich die Erzeugnisanzahl pro Weitergabe (Losgröße) durch das Verhältnis von C_{soll} und C_{abst} berechnen. Auf diese Weise lassen sich diese Losgrößen zwischen den Segmenten 1 und 2, bzw. 2 und 4 als 1,22 bzw. 2 bestimmen. Werden diese Werte abgerundet, so ergibt sich die optimale Losgröße⁴⁷ 1 bzw. 2 Erzeugnisse.

Die Losgröße muss bei der Konfiguration des Fördersystems berücksichtigt werden, d.h. die Kapazitäten von Werkstückträgern und Puffern sind dabei zu bestimmen. Der Wert C_{abst} kann aber nach einer Einlaufphase oder im Zuge der Betriebsphase korrigiert⁴⁸ werden. Diese korrigierte Taktzeit wird als C_{korr} bezeichnet. Dementsprechend lässt sich der Auslastungsgrad des Segments nach der Formel (5.24) erneuert bestimmen. Die Losgröße wird anschließend in Abhängigkeit von C_{soll} und C_{korr} korrigiert.

$$\rho_s = \frac{C_{korr}}{C_{soll}} \quad (5.24)$$

5.1.3 Systematisierung von optimierten Gestaltungs- und Betriebsalternativen

In diesem Abschnitt wird eine allgemeine Vorgehensweise dargestellt, welche bei der Gestaltung und dem Betrieb von Nachbearbeitungsschleifen helfen kann. Betrachtet wird dabei die allgemeine Struktur der Nachbearbeitungsschleife, die in Abb. 2.8 dargestellt wurde. Die methodischen Schritte lassen sich wie folgt zusammenfassen:

⁴⁷ Die berechnete Losgröße von 2 Erzeugnissen widerspricht der Regel, dass bei der Variantenfließfertigung die Losgröße eins ist.

⁴⁸ Als ein Grund für die Abweichung der Taktzeit „ C_{korr} “ von C_{abst} und C_{soll} lässt sich definieren, dass bei der Ermittlung von C_{korr} die Verkettungsverluste und der Systemnutzungsgrad berücksichtigt werden.

1. Zerlegung des Fließsystems in Segmente: Die Hauptlinie wird i.d.R. in drei Segmente eingeteilt. Das erste Segment umfasst alle Stationen und Puffer, die vor dem Zusammenführungselement vorhanden sind. Das zweite Segment liegt zwischen den Zusammenführungs- und Verzweigungselementen und bildet das Engpasssegment. Das dritte Segment (Output-Segment) umfasst die Stationen und Puffer, die nach dem Verzweigungselement vorhanden sind. Das Nachbearbeitungssegment stellt das Segment 4.
2. Berechnung der Soll-Taktzeit im jeweiligen Segment C_{soll} ausgehend von der Taktzeit des Output-Segments und mithilfe der entsprechenden entwickelten Formeln. Da jedes Segment selbst wiederum als Fließsystem gelten kann, ist abhängig von C_{soll} eine Fließbandabstimmung⁴⁹ in jedem Segment erneut durchzuführen. Demzufolge können daraus neue Taktzeiten resultieren, die als C_{abst} bezeichnet wird. Weiterhin sind die Puffergrößen erneut zu bestimmen. Jedoch stellt sich dabei die Frage, welcher Wert (C_{soll} oder C_{abst}) zur Berechnung der Taktzeiten verbundener Segmente auszuwählen ist? Die Antwort auf diese Frage basiert auf der Wirtschaftlichkeit, wobei sich die anfallenden Kosten bei gleichem Durchsatz mit der Steigerung der Stationsanzahl erhöhen. Dementsprechend ist der größte Wert zwischen C_{soll} und C_{abst} auszuwählen: $\text{Max}\{C_{\text{soll}}, C_{\text{abst}}\}$.
3. Berechnung der optimierten Losgrößen bei der Erzeugnisweitergabe zwischen Segmenten in Abhängigkeit von den Auslastungsgraden der Segmente bzw. des Fördersystems.

Der Schritt 3 wird im nächsten Abschnitt so erweitert, dass die konvergierende bzw. divergierende Struktur im Allgemeinen berücksichtigt wird.

5.2 Erweiterung zur Darstellung bzw. Verbesserung des Systemverhaltens

Ausgehend von der idealen Situation bzw. ihren Abweichungen lassen sich verschiedene Aussagen zum Systemverhalten beschreiben. In diesem Abschnitt ist vor allem die Abweichung von Soll-Taktzeiten zu betrachten, wobei die Zusam-

⁴⁹ Zusätzlich zur Taktzeit müssen auch die Vorranggraphen der Varianten in jedem Segment bekannt sein. Die Vorranggraphen der Segmente 1, 2 und 3 sind in den in Abb. 3.5 dargestellten Vorranggraphen beinhaltet. Beispielsweise setzt sich das Segment 3 von den Stationen $S_5 = \{8\}$ und $S_6 = \{11, 12\}$ zusammen. Unter Berücksichtigung der Bearbeitungszeiten der Arbeitsgänge für jede Variante stellen die Arbeitsgänge 8, 11, 12 und die Beziehungen dazwischen den entsprechenden Vorranggraph für das Segment 3 dar.

menhänge zwischen C_{soll} und C_{kor} verbundener Segmente in einem Produktnetzwerk durch die Darstellung von Kennlinien verdeutlicht werden. Zur Vereinfachung wird angenommen, dass die Abweichungen der Taktzeit C_{kor} , die in der Betriebsphase aus stochastischen Prozessen entstehen, sehr gering sind. Auf diese Weise lässt sich diese Taktzeit als deterministischer Wert bezeichnen. Also müssen dabei unter „Taktzeitabweichungen“ nur die Unterschiede zwischen den Werten von C_{soll} und C_{kor} verstanden werden. Wie beim Trichtermodell kann grundsätzlich der Bestandsverlauf in Durchlaufdiagrammen dargestellt werden. Weiterhin können durch den Vergleich zwischen den Taktzeiten benachbarter Segmente optimierte Lösungen für die Pufferkapazitäten, Losgrößen oder sogar die Entlastung vorhandener Engpässe gefunden werden.

Abb. 5.9 stellt drei verbundene Segmente 1, 2 und 3 dar, die als Teile eines Produktnetzwerkes⁵⁰ gelten. Die Soll-Taktzeiten⁵¹ dieser Segmente sind als gleich angenommen. Das Systemverhalten der Stationen S_1 und S_3 wird nachstehend untersucht und durch Durchlaufdiagramme erläutert, wobei die Skalierung der x- und y-Achse gleich angenommen sind. Das Segment 2 und die Station S_2 werden in Abb. 5.9 mit grauer Farbe gezeichnet und in Abb. 5.10, Abb. 5.11 und Abb. 5.12 ausgeblendet. Die Stationen S_1 und S_3 können ausgehen von der Taktzeitabweichung untereinander Engpässe ausbilden. Das hat zur Folge, dass Unterkapazitäten oder Überkapazitäten entstehen, die hier als Überlast bzw. Unterlast bezeichnet werden. Bevor diese Phänomene erläutert werden, wird zunächst der ideale Fall dargestellt und danach werden eventuelle Abweichungen definiert.

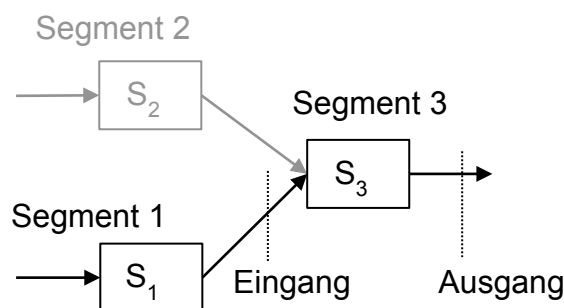


Abb. 5.9: Drei verbundene Segmente in der Fließmontage

⁵⁰ Die Stationen S_1 und S_2 stellen die letzten Stationen ihrer Segmente 1 und 2, und S_3 die erste Station ihres Segments 3 dar.

⁵¹ Das geschieht in der Montage, wenn Erzeugnisse aus den Segmenten 1 und 2 jeweils so zusammengefasst werden, dass daraus nur ein Erzeugnis am Ende des Segments 3 resultiert, vgl. Abb. 5.7.

5.2.1 Der ideale Fall

Sind C_{soll} und C_{korr} für die drei Segmente gleich (Taktzeitabweichungen treten nicht auf), so sind bei Vernachlässigung der Transportzeit die Zeitpunkte des Bearbeitungsendes eines Erzeugnisses in der Station S_1 und des Bearbeitungsbeginns in S_3 gleich. Das heißt, ein Erzeugnis wird je Taktzeit von S_1 zu S_3 transportiert. Das Durchlaufdiagramm für diesen Fall zeigt Abb. 5.10.

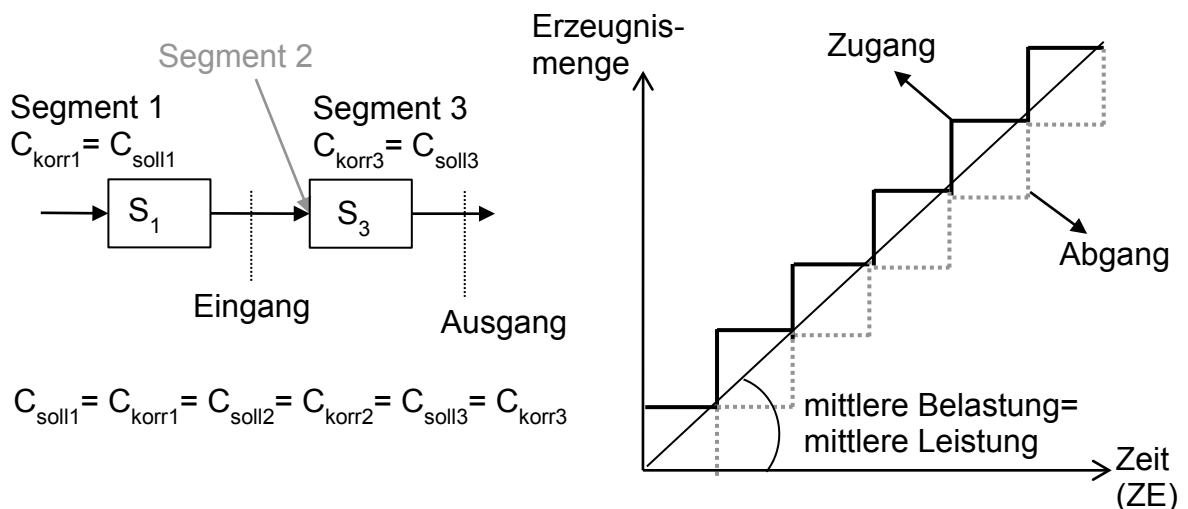


Abb. 5.10: Darstellung des idealen Falls, in Anlehnung an (Nyhuis & Wiendahl, 1999, S. 63)

Wie im Abs. 4.2.1.3 dargestellt, zeigen die vertikalen Schritte die Erzeugnisanzahl pro Weitergabe (Losgröße eins) und die horizontalen Schritte Taktzeiten an. Demzufolge bilden die Durchlaufelemente eine Kette gleichartiger Quadrate. Die Belastungs- und Leistungslinien weisen eine einzige gerade Linie auf. Weiterhin entsteht kein Bestand zwischen den Stationen und deshalb wird kein Puffer vorgesehen. Die Weitergabe von Erzeugnissen zwischen diesen Stationen kann nach dem Push-Prinzip durchgeführt werden, als ob sie zwischen zwei Stationen in einem einzigen Segment wären.

5.2.2 Unterlast

Im Folgenden wird der Fall $C_{soll3} = 2 \cdot C_{korr3}$ untersucht. Die Taktzeit des Segments 3 ist kleiner als sein optimaler Wert und deshalb ist hierbei die Bearbeitung von Erzeugnissen schneller. Die Erzeugnisse warten i.d.R. nicht auf die Bearbeitung zwischen den Segmenten. Im Vergleich zum idealen Fall tritt keine Änderung an den Daten der Station S_1 auf und deshalb wird die Zugangskurve gleich wie in Abb. 5.10 gezeichnet. Im Gegensatz halbiert sich aber die Länge der horizontalen

Durchlaufelemente. Das daraus resultierende Durchlaufdiagramm im Fall einer Losgröße eins zeigt den rechten Teil der Abb. 5.11, wobei die Abgangskurve mit der blauen gepunkteten Kurve dargestellt ist.

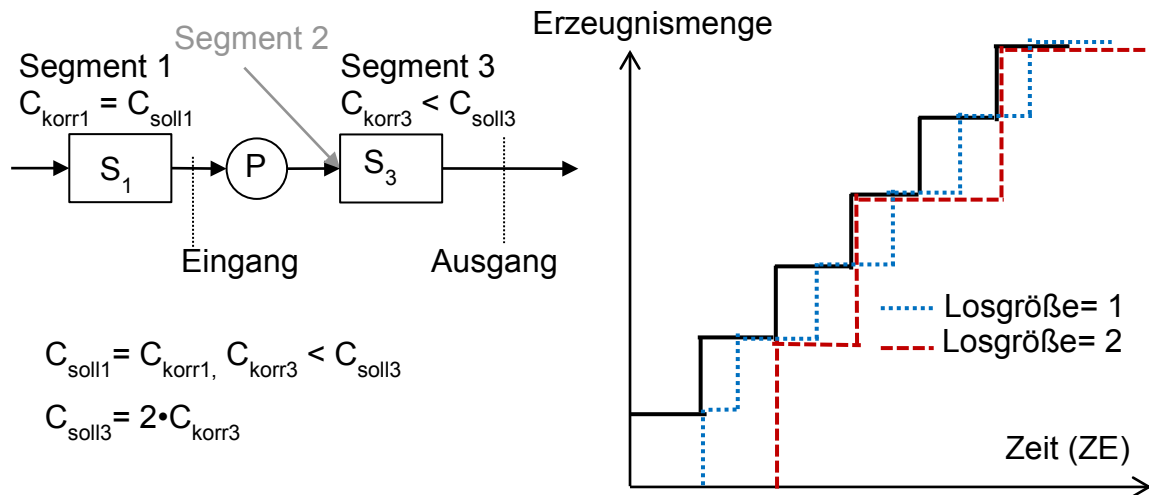


Abb. 5.11: Darstellung einer Unterlast

Es ist dabei zu bemerken, dass die sich im Segment 2 befindenden Stationen nur zu ca. 50 % belastet sind. Weiterhin führt der Mangel an zu bearbeitenden Erzeugnissen zum temporären Stillstand des Materialflusses. Wird die Losgröße verdoppelt, so reduzieren sich die Transporte bis um die Hälfte und dadurch können die Transportkosten geringer sein. Jedoch muss ein Puffer mit zwei Plätzen (entsprechend der Losgröße) zwischen den Segmenten 1 und 3 vorgesehen werden. Die neue Abgangskurve wird mit der roten gestrichelten Kurve gezeichnet. Ausgehend von der Zwischenankunftszeit (Taktzeit des Vorgängers) und Bearbeitungszeit (Taktzeit des Nachfolgers) kann man den Auslastungsgrad wie folgt berechnen:

$$\rho = \frac{C_{\text{korr3}}}{C_{\text{korr1}}} = \frac{C_{\text{korr3}}}{C_{\text{soll3}}} \quad (5.25)$$

Damit die Bearbeitungszeit eines Loses in Station S_3 die Taktzeit C_{soll3} nicht überschreitet, muss die Losgröße im Fall einer Unterlast durch die folgende Formel berechnet werden:

$$\text{Losgröße} \leq \frac{C_{\text{soll3}}}{C_{\text{korr3}}} \quad (5.26)$$

Jeder Anstieg in der Losgröße um eins verursacht eine Erhöhung der Durchlaufzeit um $C_{\text{korr}3}$ und eine Erhöhung des Bedarfs an Pufferplätzen um eins.

5.2.3 Überlast

In Abb. 5.12 unterstellt man, dass $C_{\text{soll}1}$ doppelt so groß wie $C_{\text{korr}1}$ ist. Demzufolge sind die Zwischenankunftszeiten von Erzeugnissen zum Segment 3 kleiner als die Taktzeit des Segments 3 und deshalb steigt der Umlaufbestand im System proportional mit dem Verlauf der Zeit. Hierbei gilt das Segment 3 als Engpass für den Vorgänger, jedoch nicht unbedingt für den Nachfolger. Die Zugangs- und Abgangskurven in den Fällen der Losgröße eins und zwei zeigt das Durchlaufdiagramm in Abb. 5.12 (rechts) an, wobei die blauen Kurven die Losgröße eins und die roten Kurven die Losgröße zwei darstellen.

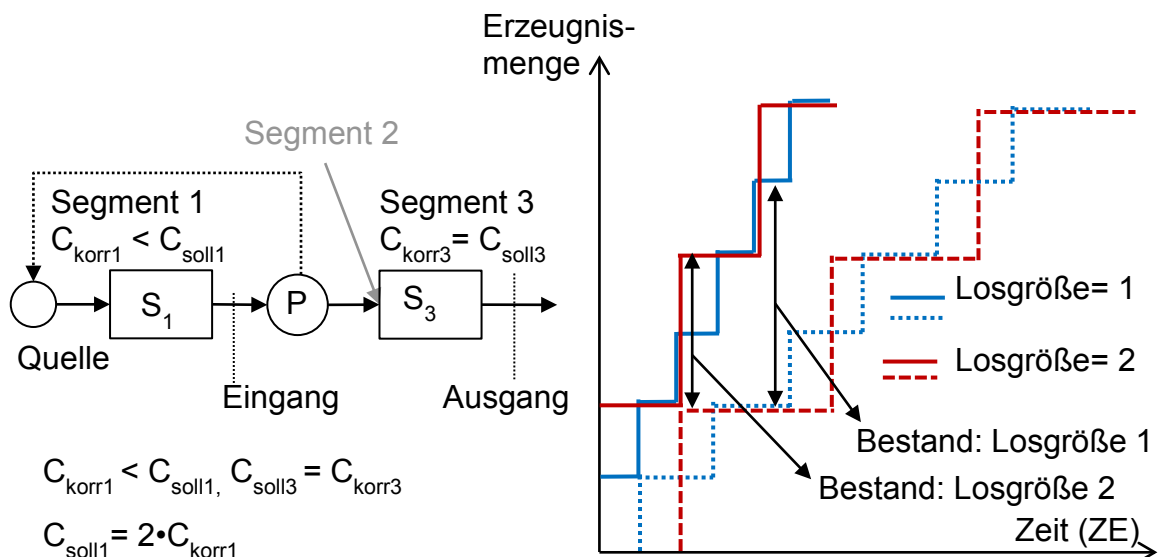


Abb. 5.12: Darstellung einer Überlast

Eine große Steigerung des Bestands darf grundsätzlich in der Praxis nicht passieren. Aus diesem Grund müssen die Pufferkapazität und die Anzahl der ankommenden Erzeugnisse durch die Terminierung der Freischaltung von Aufträgen im Segment 1 festgelegt werden. Diese Terminierung wird in Abb. 5.12 (links) durch den Rückmeldungs Pfeil dargestellt. Der Auslastungsgrad wird dabei durch diese Formel berechnet:

$$\rho = \frac{C_{\text{korr}3}}{C_{\text{korr}1}} = \frac{C_{\text{soll}1}}{C_{\text{korr}1}} \quad (5.27)$$

5.2.4 Fließsystem mit Engpass

Es werden drei nacheinander folgende Segmente 1, 2 und 3 betrachtet, vgl. Abb. 5.13. Das Segment 2 bildet einen Engpass mit einer Taktzeit $C_{\text{korr}2} > C_{\text{soll}2}$. Die Taktzeiten C_{soll} und C_{korr} des Vorgängers und des Nachfolgers sind gleich angenommen. Grundsätzlich entsteht sowohl eine Überlast zwischen dem Engpasssegment und dem Vorgänger als auch eine Unterlast zwischen ihm und dem Nachfolger.

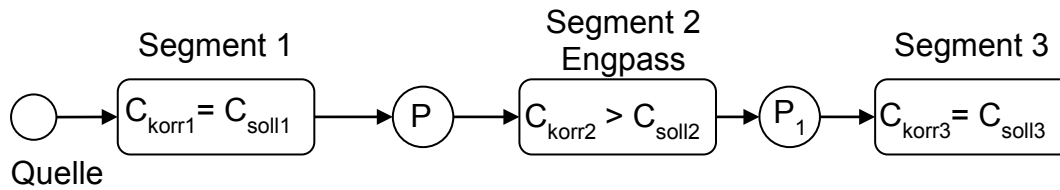


Abb. 5.13: Beispiel für drei verbundene Segmente mit einem Engpass

Der Auslastungsgrad wird im Fall der Überlast durch die folgende Formel bestimmt:

$$\rho = \frac{C_{\text{korr}2}}{C_{\text{korr}1}} \quad (5.28)$$

Auf diese Weise kann das Segment 1 in der ersten Schicht (oder Periode) 100 % ausgelastet werden, während sich das Segment 3 wegen der Abhängigkeit vom Engpass nur mit $(\rho = C_{\text{korr}3}/C_{\text{korr}2})$ belasten lässt. Innerhalb der ersten Schicht kann das Engpasssegment 2 nicht alle ankommenden Erzeugnisse bearbeiten. Deshalb ist ein Puffer P vor dem Engpass für das Bevorraten von diesen Erzeugnissen vorzusehen. Ist Mehrarbeit erlaubt, so lässt sich der Durchsatz des Engpasssegments durch Überstunden erhöhen. Die zusätzlichen Arbeitsstunden müssen i.d.R. nicht zu einer Überlast zwischen den Segmenten 2 und 3 führen. Die Überstundenzeit lässt sich durch die Multiplikation vom Bestand und der Taktzeit $C_{\text{korr}2}$ wie folgt festlegen:

$$\text{Überstundenzeit} = \text{Bestand} \cdot C_{\text{korr}2} \quad (5.29)$$

Während der Überstunden müssen die im Puffer P vorhandenen Erzeugnisse im Engpasssegment bearbeitet und zum Puffer P₁ weitergegeben werden. Ab der nächsten Schicht hat das Segment 3 die Aufgabe, die im P₁ gelagerten und die aus dem Engpass kommenden Erzeugnisse zu bearbeiten. Nach diesen Überle-

gung und Annahmen sind die Kapazitäten der Puffer P und P_1 gleich zu dimensionieren. Demzufolge ist zu erwarten, dass die Segmente 1 und 3 ab der Schicht zwei zu 100 % ausgelastet werden sollen.

5.3 Auswertung und Zusammenfassung Kapitel 5

Die Konfiguration einer Nachbearbeitungsschleife setzt voraus, dass alle benötigten Informationen aus der Arbeitsanalyse entnommen werden können. Vor allem müssen sowohl die Vorranggraphen der Nachbearbeitung für alle Varianten als auch der Anteil fehlerhafter Erzeugnisse bekannt sein. Die Qualität dieser Daten hat einen großen Einfluss auf die Entwicklung solcher Fließsysteme. Eine Umpassung von vorhandenen Nachbearbeitungsschleifen zum Zweck der weiteren Optimierung kann unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten in vielen Fällen nicht sinnvoll sein.

Die Entwicklung der Lösung für das Beispiel C ist vorwiegend von den dargestellten Annahmen abhängig. Die Optimierungsschritte der Segmente 1 und 3 sind eng mit der Engpassentlastung im Segment 2 verbunden. In diesem Zusammenhang war es von großer Bedeutung, die systematisierten Entwicklungsschritte im Allgemeinen zusammenzufassen. Die Darstellung weiterer Szenarien zur Entwicklung von Segmenten und unter Berücksichtigung der elastischen Struktur findet sich in (Al Khateeb, 2010).

Zusammenfassend liegt der Fokus der entwickelten Methode auf der Erhöhung der Segmentleistungen und der Reduzierung der Kosten durch die Optimierung der Stationsanzahl und Losgröße. Durch die Berechnung der optimalen Taktzeit bzw. der erneuerten Fließbandabstimmung der Segmente wird die Engpassentlastung behandelt. Weiterhin bietet diese Methode die Möglichkeit an, Taktzeiten mithilfe der verbundenen Segmente und unabhängig von der Jahresstückzahl zu berechnen. Das ist von großer Bedeutung, vor allem bei der Konfiguration von Schleifen in der Fließfertigung.

Mithilfe der im Abs. 5.2 dargestellten Möglichkeiten zur Beschreibung des Systemverhaltens in der Betriebsphase lassen sich Engpässe im Produktnetzwerk definieren und für einfache Fälle Lösungsansätze finden. Kommen weitere interne Einflussgrößen in Betracht, wie z.B., dass etwa die Bearbeitungszeiten häufig stochastisch schwanken, so wird die Beschreibung des Systemverhaltens schwieriger. Im Fall einer Unterlast können dabei die bereits bekannten Modelle der

Warteschlangentheorie verwendet werden. Geht man von generellen Bearbeitungszeiten aus, so kann man die Formeln der GI/G/1- oder GI/G/m-Modelle zur Berechnung der Pufferkapazitäten zwischen den Segmenten anwenden. Zur Berücksichtigung externer Einflussgrößen ist es erforderlich, kompliziertere Modelle zu entwickeln, die aber nicht Gegenstand dieser Arbeit sind.

6 Entwicklung der parallelen Struktur von Fließlinien

Um die Flexibilität bzw. die Eigenschaften der parallelen Struktur zu verbessern, werden zunächst Alternativen für die Konfiguration von parallelen Linien vorgeschlagen. An dieser Stelle wird mithilfe der in Kapitel 5 entwickelten Leistungsformeln und unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Bedingungen die Auslegung von ungleichartigen und auch gleichartigen parallelen Fließlinien dargestellt.

Der Fokus dieses Kapitels liegt aber auf der Untersuchung der Fähigkeit der parallelen Struktur im Vergleich zur seriellen Struktur, interne und externe Einflussgrößen zu bewältigen. Mit Unterstützung der Simulation werden unter realitätsnahen Bedingungen sowohl die Systemkenngrößen als auch die erreichten logistischen Kenngrößen verglichen.

6.1 Vorteile der Parallelisierung aus mathematischer Sicht

In Hinsicht auf die eventuell entstehenden Bearbeitungszeitabweichungen und Taktzeitüberschreitungen weist die parallele Struktur im Vergleich zur seriellen Struktur wesentliche Vorteile auf. Analog zur Kombinierungsmethode von Stationen im Modell von Daganzo und Blumenfeld, wobei sich die Stationsanzahl pro Linie reduziert⁵² und die Arbeitsinhalte pro Station erhöht werden, werden die zwei Stationen⁵³ S_1 und S_2 in einer Station $S_{1,2}$ zusammengefasst, vgl. Abb. 6.1.

Mathematisch lassen sich die folgenden Vorteile darstellen:

- Die Abweichung der Bearbeitungszeit der Station $S_{1,2}$ ist kleiner als die Summe der Bearbeitungszeitabweichungen von Stationen S_1 und S_2 . Die Bearbeitungszeit (T_B) einer Station lässt sich durch den Mittelwert T_k (mittlere Taktzeit, vgl. Abs. 4.1.1), die Standardabweichung σ und die Varianz $\text{Var} = \sigma^2$ darstellen. Die Maße der Abweichung werden dabei durch die Höhe der Standardabweichung dargestellt. Lassen sich bspw. die Bearbeitungszeiten der Stationen S_1 und S_2 durch Normalverteilung beschreiben, so kann man die Parameter der Station $S_{1,2}$ durch die Faltungsregeln berechnen. Die Faltung zweier Normal-

⁵² Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten soll die Stationszahl insgesamt durch die Parallelisierung gegenüber der seriellen Struktur nicht erhöht werden, vgl. Abs. 2.6.3.2 und 3.3.1.

⁵³ Diese Stationen können Teil eines Fließsystems sein.

verteilungen mit den Mittelwerten T_1 und T_2 und den Varianzen Var_1 bzw. Var_2 ergibt eine Normalverteilung, deren Mittelwert $T_{1,2}$ aus der Summe der Mittelwerte T_1 bzw. T_2 und deren Varianz $\text{Var}_{1,2}$ aus der Summe der Varianzen Var_1 bzw. Var_2 gebildet wird, vgl. (Zocher, 2002; Hübner, 2002, S. 81).

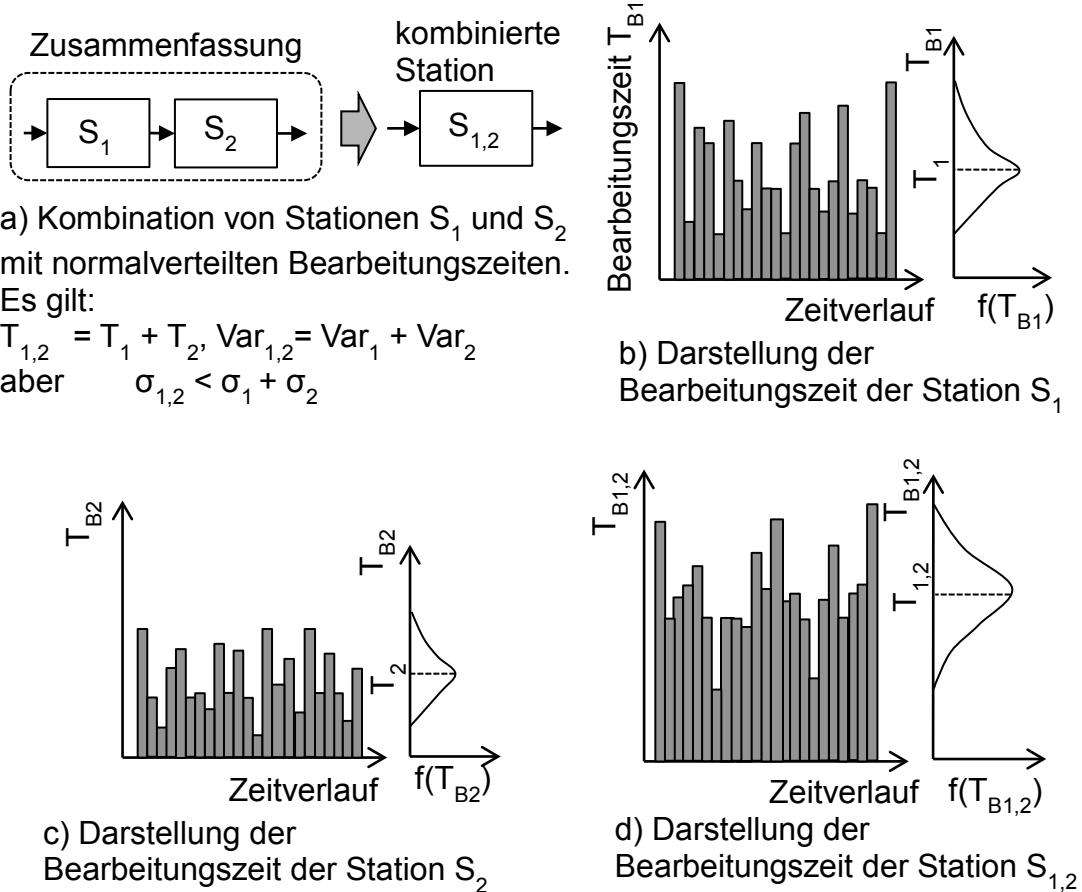


Abb. 6.1: Beispiele für zeitliche Verläufe von Bearbeitungszeiten zweier Stationen S_1 bzw. S_2 und der sich ergebenden kombinierten Station $S_{1,2}$

Es gilt das Folgende:

$$T_{1,2} = T_1 + T_2 \quad (6.1)$$

$$\text{Var}_{1,2} = \text{Var}_1 + \text{Var}_2; \text{Var} = \sigma^2 \quad (6.2)$$

$$\sigma_{1,2} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (6.3)$$

$$\sigma_{1,2} < \sigma_1 + \sigma_2 \quad (6.4)$$

- Die resultierende Taktzeit der parallelen Linien ist geringer als die Taktzeit der ursprünglichen Linie, solange die Bearbeitungszeiten der zu kombinierenden Stationen nicht gleich sind. Ist die Taktzeit der Linie⁵⁴ gleich der Stationstaktzeit T_1 und T_1 größer als T_2 , so gilt:

$$T_1 + T_2 < 2 \cdot T_1 \quad (6.5)$$

Eine weitere Reduzierung der Taktzeit kann man durch die neue Durchführung der Fließbandabstimmung oder unter Beachtung einer der Zielfunktionen erreichen, vgl. Formeln (3.15)-(3.18).

- Da die Taktzeiten der einzelnen parallelen Linien größer als die Taktzeit der Linie in der seriellen Struktur sind, ist die Wahrscheinlich hier größer, eine Taktzeitüberschreitung zu verhindern oder ihre Wirkungen zu mindern, vgl. Beispiel B im Abs. 3.3.3.

6.2 Alternativen zur Konfiguration paralleler Strukturen

Die benötigten Daten (Taktzeit, Anzahl von Stationen bzw. parallelen Linien) für die Konfiguration gleichartiger paralleler Fließlinien lassen sich mithilfe der Formel (2.2) berechnen. In der jeweiligen Linie können i.d.R. alle Varianten mit gleichen Produktionsgeschwindigkeiten gefertigt werden. In der Praxis mag es aber aus dem Grund der Einhaltung von unterschiedlichen Lieferterminen dazu kommen, dass ein Auftrag oder eine Variante schneller gefertigt bzw. geliefert werden muss, als die anderen Aufträge. Außerdem ist ausgehend von den unterschiedlichen Vorranggraphen der Varianten bereits bekannt, dass die Arbeitsmengen und auch die Produktionsgeschwindigkeiten von Varianten in einer Linie unterschiedlich sein können. Diese Überlegung führt dazu, dass es von Vorteil ist, unterschiedliche parallele Linien mit unterschiedlichen Produktionsgeschwindigkeiten zu planen. Dementsprechend lassen sich ungleichartige parallele Fließlinien mit unterschiedlichen Stationsanzahlen und Taktzeiten auslegen. Allerdings muss dabei die Wirtschaftlichkeit jeder Konfigurationsalternative berücksichtigt werden. Deshalb wird grundsätzlich darauf abgezielt, die gesamte Stationsanzahl und weiterhin die Taktzeit des Gesamtsystems im Vergleich zur seriellen Struktur nicht zu erhöhen. Die Erreichung dieses Ziels stellt eine wesentliche Voraussetzung bei der Parallelisierung von Fließlinien dar.

⁵⁴ Taktzeit der Linie entspricht der größten Stationstaktzeit in der Linie.

Der im Rahmen dieser Arbeit vorgeschlagene Lösungsansatz wird anhand eines Beispiels verdeutlicht. Als Alternative für eine Fließlinie D (serielle Struktur) mit Soll-Taktzeit C_{sollD} sind zwei entsprechende Linien A und B (parallele Struktur) mit gleichen oder unterschiedlichen Soll-Taktzeiten C_{sollA} bzw. C_{sollB} zu planen, vgl. Abb. 6.2. Für diesen Zweck verbindet man die Linie A bzw. B mit der Linie D durch einen Pfeil, als ob die Linie D der Nachfolger in einem Produktnetzwerk wäre. Auf diese Weise lässt sich hier die Linie D als fiktive Linie bezeichnen.

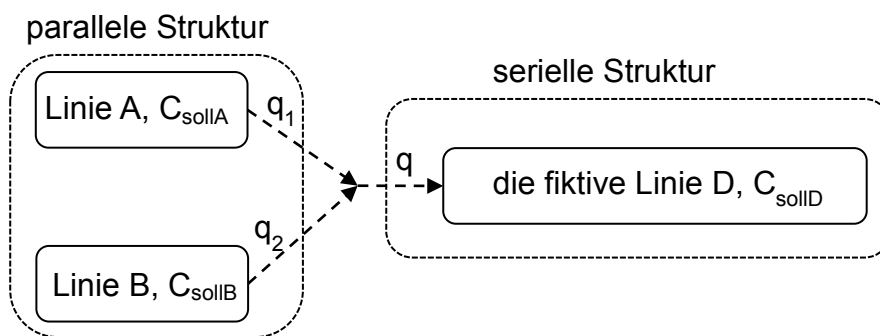


Abb. 6.2: Skizzierung von zwei parallelen Linien und ihrer äquivalenten fiktiven Linie

Anhand dieser Überlegung und unter der Annahme, dass die Mengenanteile q_1 , q_2 und die Taktzeit C_{sollD} bekannt sind, werden C_{sollA} und C_{sollB} durch die entsprechenden Leistungsformeln wie folgt berechnet:

$$\frac{1}{C_{\text{sollA}}} = q_1 \frac{1}{C_{\text{sollD}}} \quad (6.6)$$

$$\frac{1}{C_{\text{sollB}}} = q_2 \frac{1}{C_{\text{sollD}}} \quad (6.7)$$

Mithilfe dieser Formeln lassen sich im Allgemeinen die Soll-Taktzeiten in paralleler Struktur bestimmen. Dabei wird das Folgende beachtet:

- Gleichartig parallele Fließlinien: Die geplanten Mengenanteile sind gleich. Im Fall von zwei Linien: $q_1 = q_2 = q/2$
- Ungleichartig parallele Fließlinie: Es gilt im Fall von zwei Fließlinien: $q_1 \neq q_2$, $q_1 + q_2 = q$. Es wird hier zwischen zwei Strategien unterschieden:
 1. Die Linien können jeweils alle Varianten fertigen. Sie haben aber unterschiedliche Taktzeiten. Es ist je nach der Problemstellung, z.B. prognostizierte Auftragsschwankungen⁵⁵, über die Produktionsgeschwindig-

⁵⁵ Die Fähigkeit paralleler Linien zur Bewältigung von Auftragsschwankungen wird im Abs. 6.4.1 dargestellt.

- keit und auch über die Anteile der zu fertigenden Erzeugnisse in jeder Linie zu entscheiden.
2. Ausgehend von den Mengenanteilen der Varianten lassen sich nur die Varianten, die z.B. nahezu gleiche Arbeitsmengen haben, in einer Linie fertigen. Den Erzeugnisanteil berechnet man durch die Summe der Anteile aller zu fertigenden Erzeugnisse in dieser Linie.

Im Vergleich zu gleichartigen Fließlinien sind i.d.R. die Stationen in den ungleichartigen Fließlinien nicht gleich und deshalb kann es sein, dass die parallelen Arbeitsgänge in den Linien räumlich nicht nebeneinander liegen. Das hat zur Folge, dass Synergien zwischen den Linien schwieriger realisiert werden können. Wegen der Schwankung der Aufträge oder der Anzahlen der zu fertigenden Varianten durch die Perioden entstehen weiterhin auch Nachteile, wobei es sein kann, dass Überkapazitäten in manchen Linien und gleichzeitig Unterkapazitäten in anderen Linien auftreten. Aus diesen Gründen konzentrieren die nachstehenden Untersuchungen auf gleichartige parallele Fließlinien.

6.3 Simulationsuntersuchungen

6.3.1 Auswahl der Untersuchungsvorgehensweise

Die Wahl der Vorgehensweise zur Darstellung des Betriebsverhaltens verketteter Fließsysteme und insbesondere zur Ermittlung ihrer Leistungen hängt vor allem davon ab, ob die Vorgehensweise bzw. ihre Werkzeuge das System eindeutig beschreiben können. Mit Unterstützung dieser Vorgehensweise sind sowohl die Verfügbarkeit und der Nutzungsgrad der Stationen bzw. des gesamten Systems als auch die Puffergrößen zu bestimmen. Wie im Abs. 4.1.3 erläutert, ist die Bestimmung von Gesamtverfügbarkeit und -nutzungsgrad in elastischer Verkettung analytisch nicht möglich. Deshalb wird die Simulation für diesen Zweck verwendet.

Einen Überblick über die verschiedenen Simulationswerkzeuge, -anwendungen und dazu gehörigen Methoden findet sich in (Hofacker, 2010). Weiterhin hat Hofacker Bewertungskriterien vorgeschlagen, um die von ihm betrachtete Simulationssoftware zu vergleichen. Dabei wird gezeigt, dass u.a. die ereignisorientierte Simulationssoftware „Plant Simulation⁵⁶“ von Technomatix die gewünschte Genauigkeit, einen beliebigen Detaillierungsgrad und eine umfangreiche

⁵⁶ Plant Simulation (ehemals eM-Plant bzw. SIMPLE++) ist ein Produkt der Siemens AG vgl. (Czarnietzki, 2008).

Prozessanalyse ermöglicht⁵⁷. Aus diesem Grund wird diese Simulationssoftware zur Modellierung und Simulation von Fließlinien benutzt.

6.3.2 Simulationsmodelle

Es wird im Folgenden angestrebt, ein typisches realitätsnahes Basismodell zu entwickeln, das verschiedene praktische Anwendungsfälle unter Berücksichtigung realitätsnaher Randbedingungen unterstützt. Das Modell wird im Allgemeinen als Fließmontagesystem abgebildet. Die Struktur des Fertigungssystems, das Transportsystem und die wichtigsten Kenngrößen sind sorgfältig so auszuwählen, dass sie den praktischen Erfahrungen in der Fachliteratur veröffentlichter Betriebsuntersuchungen entsprechen. In nächsten Schritten werden systematisch Fortentwicklungen des Basismodells in Hinsicht auf die Systemstruktur, das Weitergabesystem, und die Änderung von Rahmenbedingungen vorgenommen. Das Hauptziel ist dabei, die Kenngrößen von seriellen und den „entsprechenden“ parallelen Strukturen zu vergleichen und das darzustellen.

In Anlehnung an das im Abs. 3.3.3 dargestellte Beispiel B und die im Abs. 4.1.4 erwähnten typischen Kenngrößen lassen sich die struktur- und stationsbezogenen Parameter des Basismodells definieren. Die zu untersuchende serielle Struktur stellt die optimierte Lösung des Beispiels B dar, wobei die Arbeitsgänge des in Abb. 3.5 gezeigten Vorranggraphen auf sechs Stationen verteilt werden, vgl. Tab. 3.4. Die adäquate parallele Struktur entsteht auf zwei gleichartigen parallelen Linien mit insgesamt sechs Stationen. Dabei verdoppeln sich die benötigten Arbeitsgänge und werden gleichmäßig auf gleichartige Stationen in den zwei Linien verteilt. Die Varianten lassen sich jeweils in der ersten oder zweiten Linie fertigen. Nach den Formeln (6.6) bzw. (6.7) oder (2.2) und unter der Annahme, dass q_1 und q_2 gleich ($q_1 = q_2 = 0,5$) sind, wird die erforderliche Taktzeit der jeweiligen Linie berechnet. Diese ist gleich für die beiden Linien und beträgt 22 ZE.

Zur neuen Verteilung der Arbeitsgänge auf die Stationen in einer der parallelen Linien werden je zwei nacheinander folgende Stationen, d.h. S_1 und S_2 , S_3 und S_4 bzw. S_5 und S_6 , in einer Station zusammengefasst. Dementsprechend werden die

⁵⁷ Dies entspricht auch den Erfahrungen des Fachgebiets Fabrikbetrieb der TU Ilmenau und ebenso der des Autors.

Arbeitsgänge den Stationen wie folgt zugeordnet⁵⁸: $S_1 = \{1,2,5\}$, $S_2 = \{3,4,6,7,9,10\}$, $S_3 = \{8,11,12\}$, vgl. Tab. 6.1.

Tab. 6.1: Überblick über die Stationsbearbeitungszeiten für eine parallele Fließlinie

	S_1	S_2	S_3	T_v
T_{k1}	18	19	18	18,33
T_{k2}	19	18	15	17,33
T_{k3}	23	14	24	20,33
$T(S_k)$	19	18	18	

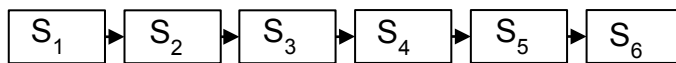
Trotz der Parallelisierung entstehen ebenso in diesem Beispiel wie bei serieller Struktur Taktzeitüberschreitungen, wobei die Bearbeitungszeiten der Stationen S_1 und S_3 bei der Ausführung der Variante v_3 größer als die Taktzeit ist. Die allgemeinen Informationen zur Modellierung der beiden Strukturen fasst Abb. 6.3 zusammen. Dabei setzt sich die serielle Struktur aus 6 Stationen zusammen (Abb. 6.3.a). Sind die Stationen durch Puffer entkoppelt, so ergibt sich die serielle elastische Struktur (Abb. 6.3.b). Die parallele Struktur setzt sich aus den gleichartigen parallelen Linien A und B mit jeweils 3 Stationen zusammen. Analog zur seriellen Struktur wird die parallele starre bzw. elastische Struktur modelliert (Abb. 6.3.c, d).

Die Bearbeitungszeiten der Stationen jeweils in jeder Struktur und für jede Variante werden den Tab. 3.4 und Tab. 6.1 entnommen (Abb. 6.3.e, f). Die Stationen sind zunächst in den beiden Modellen starr verkettet, d.h. die Weitergabe von Erzeugnissen zu nachstehenden Stationen geschieht gleichzeitig. Die Erzeugnisse oder Werkstückträger sind fest mit dem Transportsystem verbunden (Abb. 6.3.g). Die gesamte Transportzeit setzt sich dabei aus Verweilzeit und Transportzeit zusammen. Nur während der Verweilzeit⁵⁹ können Montagevorgänge erfüllt werden.

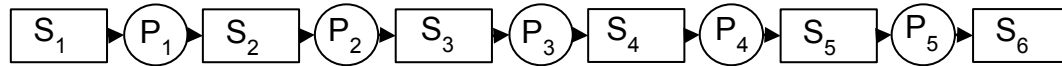
Werden Puffer zwischen den Stationen in einem nächsten Schritt vorgesehen, so haben sie die Aufgabe, sowohl die Erzeugnisse zu transportieren als auch zu bevorraten. In diesem Fall haben die Werkstückträger keine feste Verbindung mit der Fördereinrichtung. Ein typisches Beispiel dafür ist das Rollenbahnsystem.

⁵⁸ Es wird versichert, dass diese Lösung die Beste von vielen durch den Autor geprüften Lösungen ist.

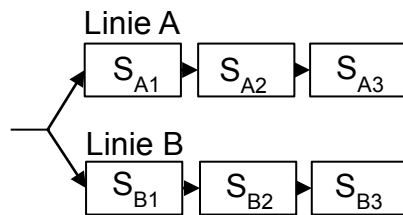
⁵⁹ Als Ausnahme lassen sich Montagetätigkeiten bei der Montage von komplizierten Produkten (z.B. Autos) während der Weitergabe erfüllen. Hierbei gleicht die Transportzeit zwischen je zwei nacheinander folgenden Stationen der größten Bearbeitungszeit der Stationen in der Fließlinie, wobei grundsätzlich die Taktzeit von der Geschwindigkeit des Fördersystems abhängig ist.



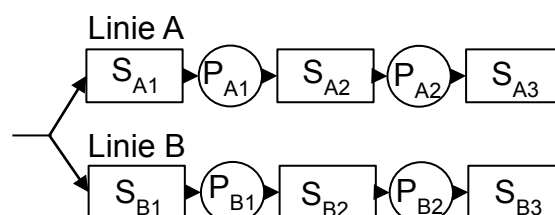
a) serielle starre Struktur



b) serielle elastische Struktur



c) parallele starre Struktur



d) parallele elastische Struktur

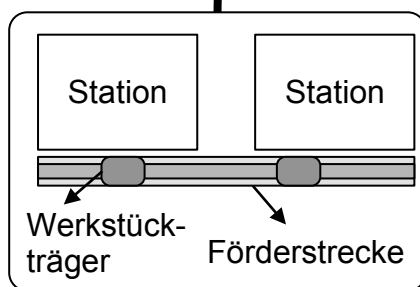
e) Stationsbelastungen [ZE]
(serielle Struktur)

S_k	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	T_v
T_{k1}	7	11	9	10	7	11	9,17
T_{k2}	11	8	11	7	4	11	8,67
T_{k3}	13	10	5	9	13	11	10,17
$T(S_k)$	9	10	9	9	7	11	

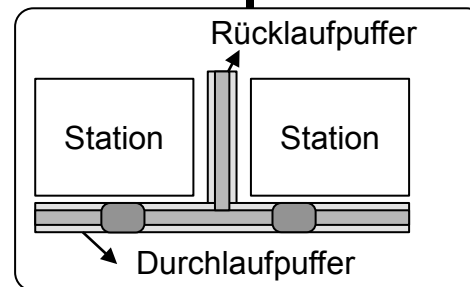
f) Stationsbelastungen [ZE]
(parallele Struktur)

S_k	S_{A1}, S_{B1}	S_{A2}, S_{B2}	S_{A3}, S_{B3}	T_v
T_{k1}	18	19	18	18,33
T_{k2}	19	18	15	17,33
T_{k3}	23	14	24	20,33
$T(S_k)$	19	18	18	

g) Weitergabensystem



h) Pufferanlagen



i) Varianten

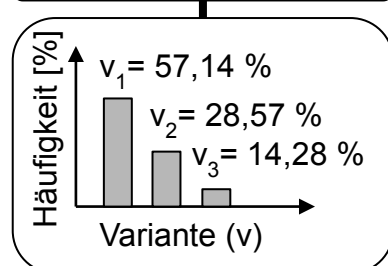
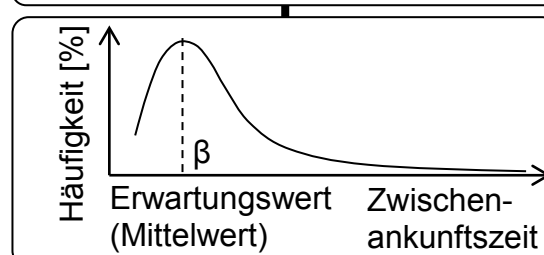
j) Verteilung ankommender
Aufträge

Abb. 6.3: Allgemeine Informationen zu den Strukturen und Kenngrößen der Simulationsmodelle

Um die Transportwege bei elastischer Struktur möglichst nicht zu erhöhen, geht man von Durchlauf- bzw. Rücklaufpuffer aus, vgl. Abb. 6.3.h. Solange ein Pufferplatz im Durchlaufpuffer frei ist, tritt kein Erzeugnis im Rücklaufpuffer auf. Beachtet man die mögliche erreichbare Geschwindigkeit entsprechender Transportmittel, bspw. von 0,1 bis 2 m/s bei angetriebener Rollenbahn und 2 m/s bei Linearmotoren-Förderer (vgl. Tab. 4.1) und die oben erwähnten Rahmenbedingungen, so lassen sich die Transportzeiten bei starrer und elastischer Verkettung im Vergleich zu den Bearbeitungszeiten vernachlässigen. Die Erzeugung von Aufträgen durch die Quellen geschieht stochastisch unter der Berücksichtigung der Variantenanteile⁶⁰ (Abb. 6.3.i). Jeder Auftrag stellt ein einzelnes Erzeugnis dar. Weiterhin werden Stillstände, wie z.B. nicht geplante Zeiten (Sonn- und Feiertage), Instandhaltungszeiten, Rüstzeiten, Auftragsmangel (außer bei Untersuchungsgruppe 1, vgl. Abb. 6.4) etc., nicht berücksichtigt. Dementsprechend gleicht die Untersuchungsdauer der Nutzungsdauer T_{Nutz} (vgl. Abb. 4.1) und ebenso der Durchlaufzeit.

Die Simulationsuntersuchungen lassen sich hauptsächlich in zwei Gruppen unterteilen. In der ersten Untersuchungsgruppe werden die Nachfrageschwankungen (externe Einflussgröße) berücksichtigt, wobei die erste Station der Linie aufgrund der Auftragsmängel „hungrig“ sein darf. Dabei sind die Eigenschaften der beiden starren Strukturen zu analysieren, vor allem um die negativen Auswirkungen von Nachfrageschwankungen zu bewältigen. Das Auftreten von Aufträgen streut unregelmäßig über den Betrachtungszeitraum, wobei die Zeitdifferenz zwischen zwei zufällig nacheinander kommenden Aufträgen (Zwischenankunftszeit) durch die Exponentialverteilung dargestellt werden kann (Abb. 6.3.j), die grundsätzlich durch den Parameter β (Erwartungswert oder Mittelwert) beschrieben wird. Die Exponentialverteilung wird häufig zur Beschreibung von Zeitspannen wie z.B. bei Kundenaufträgen benutzt, vgl. (Bamberg, Baur, & Krapp, 2012, S. 101). Im Zuge der zweiten Untersuchungsgruppe geht man davon aus, dass kein Auftragsmangel an der ersten Station auftritt. Die aus der Schwankung von Bearbeitungszeiten und der Entstehung von Störungen resultierenden Zeitverluste sind hierbei bei starren und elastischen Strukturen zu untersuchen. Die geplanten Untersuchungsreihen lassen sich in Abb. 6.4 zusammenfassen.

⁶⁰ Im Beispiel B wurde erwähnt, dass innerhalb eines Planungszeitraums von 77 ZE 4 Produkte der Variante v_1 , 2 Produkte der Variante v_2 und ein Produkt der Variante v_3 zu fertigen sind. Dementsprechend sind die Variantenanteile (im Folgenden gilt auch Erzeugnisanteile) 57,14 % der v_1 , 28,57 % der v_2 und 14,28 % der v_3 .

	Untersuchungsgruppe 1 (externe Einflussgrößen)	Untersuchungsgruppe 2 (interne Einflussgrößen)
starre Verkettung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nachfrageschwankung <ul style="list-style-type: none"> • Variierung von Zwischenankunftszeiten • Fließlinienflexibilität 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ stets vorhandene Aufträge <ul style="list-style-type: none"> • Bearbeitungszeitschwankung (beim Variantenwechsel) • Variantenverteilung auf den parallelen Linien
elastische Verkettung		<ul style="list-style-type: none"> ▪ stets vorhandene Aufträge <ul style="list-style-type: none"> • Puffer zur Bewältigung von Bearbeitungszeitschwankung • Störungen in automatisierten und hybriden Fließmontagesystemen • Puffer zur Bewältigung von Störungsauswirkungen bzw. Bearbeitungszeitschwankung

Abb. 6.4: Untersuchungsplan

6.4 Ergebnisse der Simulation

6.4.1 Nachfrageschwankung (externe Einflussgröße)

Unternehmen verfügen im Regelfall über einen Auftragsbestand größer Null, wenn über die Annahme von Kundenaufträgen zu entscheiden ist. Der Kunde selbst geht aufgrund der Marktverhältnisse davon aus, dass er feste Liefertermine vom Unternehmen verlangen kann. Dabei müssen die Unternehmen ausgehend von den vorhandenen Kapazitäten und dem Auftragsbestand über die Auftragsannahme entscheiden, vgl. (Czeranowsky, 1974, S. 2; Boysen, 2005, S. 159f). Insbesondere in der Endmontage muss dabei überprüft werden, ob alle benötigten Teile vorhanden sind, bevor die Erzeugnisse auf die Montage-Fließlinien gebracht werden. Zunächst wird in den folgenden Simulationsuntersuchungen von max. 10 möglichen wartenden Aufträgen vor der Montage ausgegangen.

In dieser Untersuchungsgruppe werden nur die starren Strukturen berücksichtigt (Abb. 6.3.a, c). Die Erwartungswerte der Zwischenankunftszeiten von Erzeugnissen werden zwischen 11-20 ZE variiert. Anschließend werden die Simulationsergebnisse für die drei Mittelwerte von β 11, 15 und 20 ZE dargestellt. Die Annahme von $\beta = 11$ ZE bedeutet, dass die Ankunftsrate der Erzeugnisse ($\lambda = 1/11 =$

0,09 Stck/ZE) dem geplanten Durchsatz des Fließsystems Q_{soll} gleicht. Die Erhöhung des Werts β führt logischerweise zur Verschlechterung des erwartenden Durchsatzes. Die Abb. 6.5. zeigt, wie stark die Abweichung der Zwischenankunftszeiten vom Mittelwert sein kann.

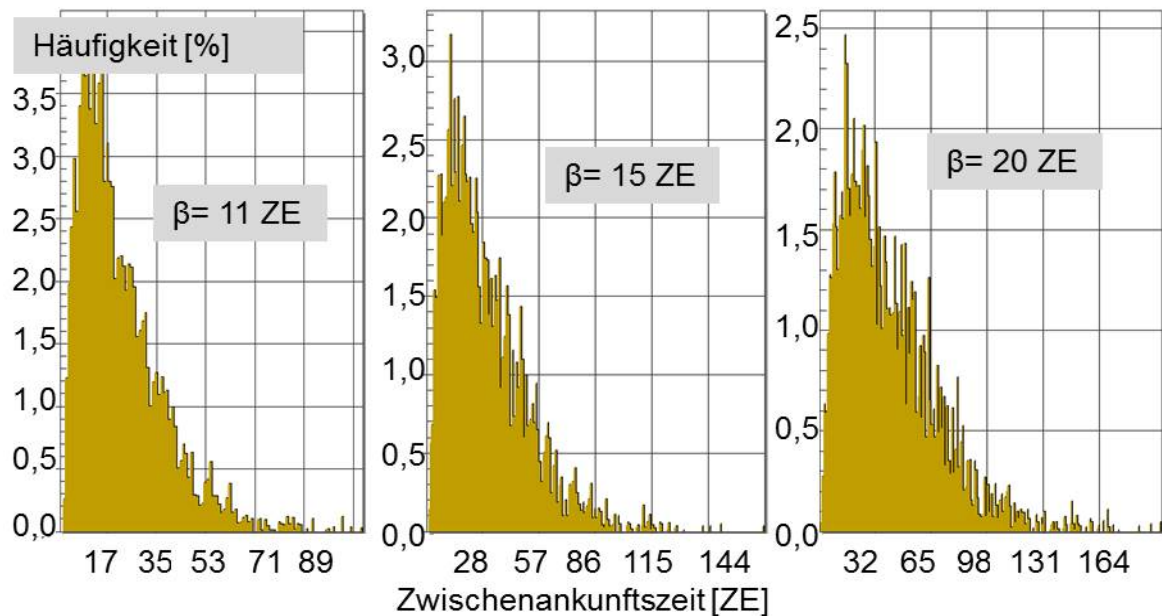


Abb. 6.5: Untersuchte Verteilungen der Zwischenankunftszeiten von Aufträgen

Die Untersuchungsdauer muss lang genug gewählt werden, so dass Ergebnisse in der eingeschwungenen Phase ermittelt werden. Für diesen Zweck lässt man die Simulation für eine Ausbringungsmenge von 7000 Stck laufen. Werden die Variantenanteile berücksichtigt, so sind 4000 Stck der v_1 , 2000 Stck der v_2 und 1000 Stck der v_3 zu fertigen. Bei paralleler Struktur haben die Varianten jeweils die gleiche Priorität in den parallelen Linien. Zusätzlich zu dem Durchsatz lassen sich die benötigten Durchlaufzeiten (DLZ) ermitteln und die Betriebszeitanteile der Stationen am Ende jeder Untersuchung darstellen.

Zuerst wird der Mittelwert der Zwischenankunftszeit ($\beta = 11$ ZE) untersucht. Bei serieller Struktur dauert die Fertigung von 7000 Stck 82851 ZE mit einem Durchsatz von $Q_{\text{ser}} = 0,0844$ Stck/ZE, während sich bei paralleler Struktur dieselbe Produktmenge mit einer DLZ = 76572 ZE und einem Durchsatz von $Q_{\text{par}} = 0,0914$ Stck/ZE fertigen lässt. Diese Ergebnisse zeigen eindeutig, dass ausgehend von Taktzeitüberschreitungen bei serieller Struktur eine Arbeitsüberlastung zu erwarten ist. Im Gegensatz dazu überschreitet der Durchsatz Q_{par} den geplanten Wert Q_{soll} trotz der Taktzeitüberschreitung, vgl. Abb. 6.6.

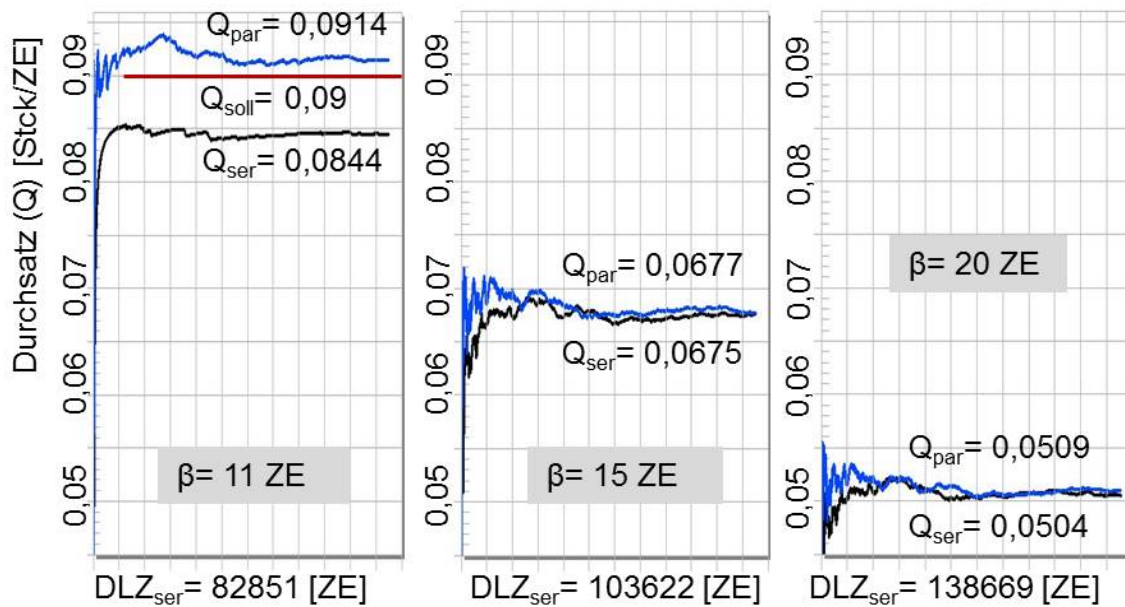


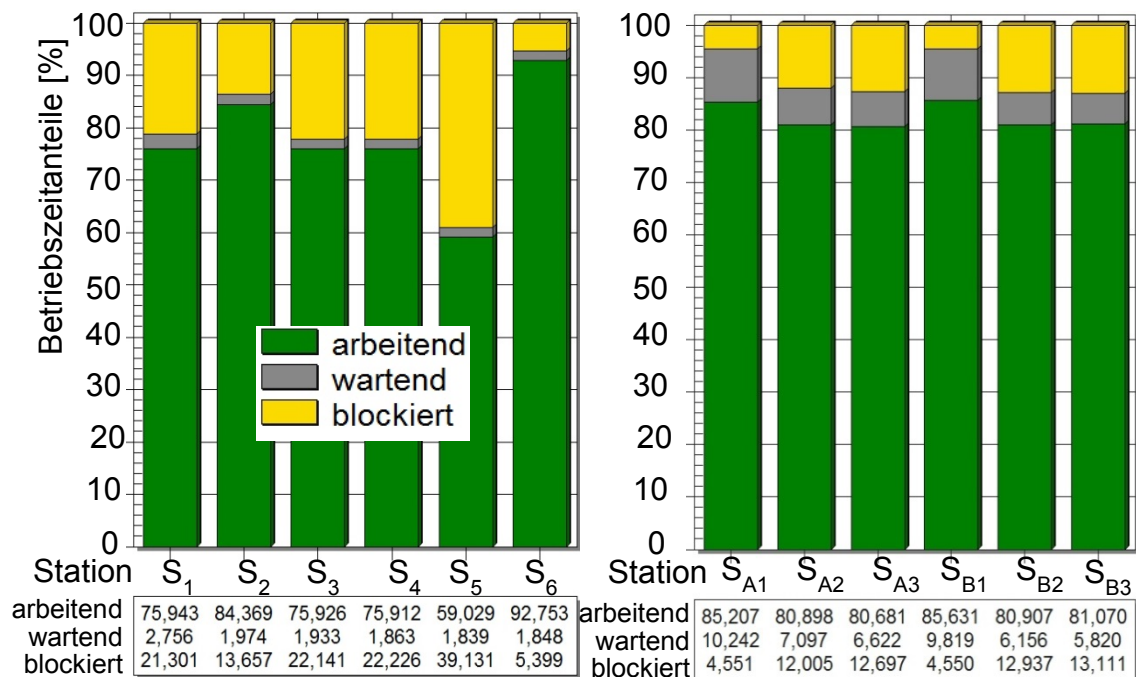
Abb. 6.6: Einfluss von Nachfrageschwankungen auf die Durchsätze serieller und paralleler Strukturen

Dieses Phänomen kann man mithilfe Abb. 6.3. e, f dadurch erklären, dass die Taktzeitüberschreitung nur bei der Bearbeitung der Variante v_3 geschieht, welche den kleinsten Variantenanteil aufweist. Also ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass in mehreren Zeitabschnitten nur Variante v_2 und/oder v_3 , in einer oder beider parallelen Linien mit der Taktzeit 19 ZE (die größte Bearbeitungszeit dieser Varianten) bearbeitet werden. Dieser Wahrscheinlichkeitswert hängt nicht nur von Variantenanteilen, sondern auch von der Linienlänge (Stationsanzahl in der Linie) ab. Dagegen sind die Bearbeitungszeitabweichungen für die Varianten v_1 und v_2 bei paralleler Struktur sehr viel kleiner im Vergleich mit der seriellen Struktur. Außerdem betragen die gesamten Anteile dieser Varianten 85,71 %.

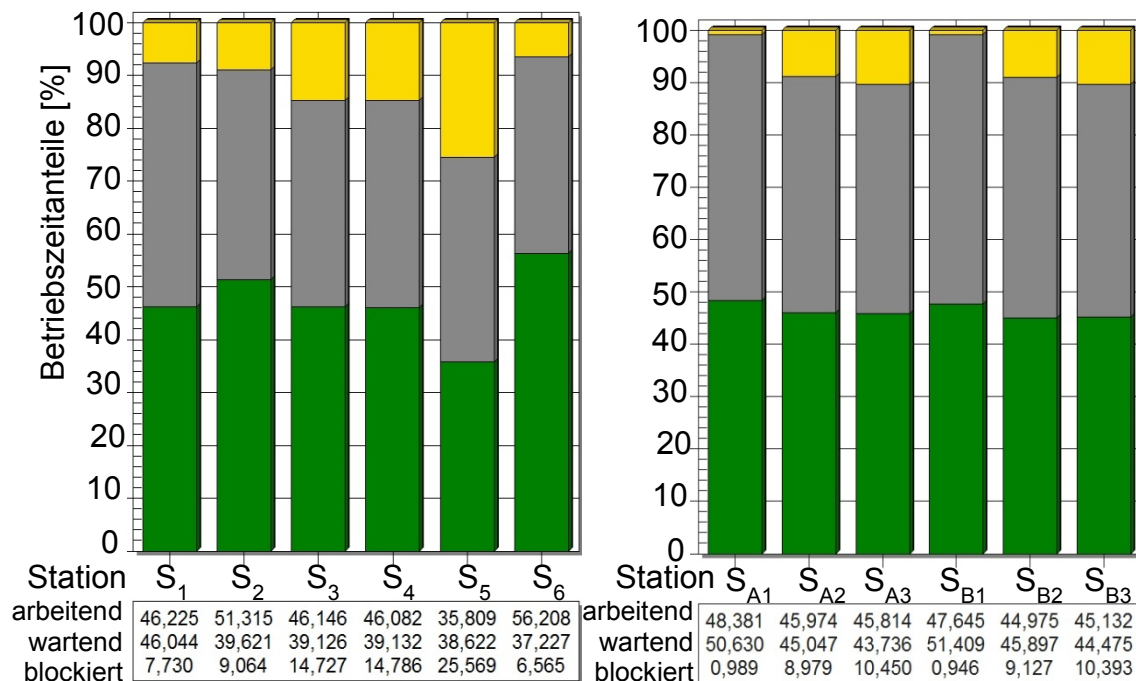
Die Ergebnisse der Untersuchungen von $\beta = 15$ bzw. 20 ZE zeigen erhebliche Erhöhungen der DLZ und damit erhebliche Reduzierungen der Durchsätze bei den beiden Strukturen. Auffällig ist aber, dass der Unterschied zwischen den sich ergebenden Durchsätzen der beiden Strukturen stark reduziert ist. Vielmehr zeigt Abb. 6.6 Überschneidungen der Durchsatzlinien an.

Um weitere Erklärungen dieser Ergebnisse zu finden, hilft die Darstellung von Betriebszeitanteilen der Stationen, die für die Fälle $\beta = 11$ und 20 ZE in Abb. 6.7 veranschaulicht sind. Die Betriebszustände finden sich dabei in drei Formen: Bear-

beitungszustand oder Nutzungsgrad⁶¹ „arbeitend“ (grün), Wartezustand „wartend“ (grau) und Blockierungszustand „blockiert“ (gelb).



a) $\beta = 11ZE$. Links: serielle Struktur, rechts: parallele Struktur



b) $\beta = 20ZE$. Links: serielle Struktur, rechts: parallele Struktur

Abb. 6.7: Einfluss von Nachfrageschwankungen auf das Betriebsverhalten

⁶¹ Der Nutzungsgrad berechnet sich durch die Formel (4.6). Da in der vorliegenden Arbeit organisatorische Ausfallzeit und Instandhaltungszeit entfallen, entspricht dem Nutzungsgradwert der Wert des Zustandes „arbeitend“.

Ein Blockierzustand kommt in einer Station bei starrer Verkettung vor, wenn das in dieser Station befindliche Erzeugnis schon bearbeitet ist, aber wegen des Stillstandes des Transportsystems nicht weitergegeben wird, solange nicht die Bearbeitung aller Erzeugnisse in der Linie beendet ist, d.h. solange die Bearbeitung der Variante mit der größten Bearbeitungszeit nicht beendet ist. Die Höhe der Blockierzeitanteile spiegelt die negativen Auswirkungen von Engpässen in der Linie wieder. Der Wartezustand kommt vor, wenn das Transportsystem wegen Auftragsmangel stoppt. Die Höhe der Wartezeitanteile drückt die negativen Auswirkungen des Auftragsmangels aus.

Im Allgemeinen zeigt Abb. 6.7 mehr Schwankungen in den Stationsnutzungsgraden bei serieller Struktur, denn die mittleren Bearbeitungszeiten der Stationen (vgl. $T(S_k)$ in Abb. 6.3.e, f) schwanken stärker als bei der paralleler Struktur. So ist ersichtlich, dass die Station S_5 den geringsten Nutzungsgrad aufweist, da ihre Bearbeitungszeiten für Variante v_1 bzw. v_2 mit Variantenanteil von 57,14 % bzw. 28,57 % stark von der Taktzeit abweicht ist. Dagegen bemerkt man eine solche Reduktion nicht z.B. bei S_{A2} und S_{B2} , denn die starke Abweichung betrifft hierbei die Variante v_3 mit dem geringsten Variantenanteil von 14,28 %.

Durch die Simulation lassen sich die Anteile der Blockierzeiten und Wartezeiten ermitteln. Eindeutig ist dabei, dass mit $\beta = 11$ ZE aufgrund des Auftragsmangels die parallelen Fließlinien häufiger gestoppt werden. Dieses Ergebnis besagt auch, dass dabei die Bearbeitung unterschiedlicher Varianten schneller ist. Weiterhin wird diese Tatsache durch die Ermittlung der Blockierzeitanteile bestätigt, wobei sie bei serieller Struktur größer sind. Insgesamt ist die Summe der Verlustzeitanteile bei serieller Struktur höher als bei paralleler Struktur.

Ein Vergleich zwischen den Verlustzeitanteilen bei $\beta = 20$ ZE zeigt, dass der Erhöhung der Blockierzeitanteile bei serieller Struktur eine Erhöhung der Wartezeitanteile bei Paralleler Struktur gegenübersteht. Die Folge davon ist ein nahezu gleicher mittlerer Nutzungsgrad in den beiden Strukturen. Es ist in jedem Fall zu bemerken, dass bei paralleler Struktur die Auswirkung des Auftragsmangels immer höher ist, als bei der seriellen Struktur.

Wird die Untersuchungsdauer von 82851 ZE festgelegt und weiterhin die Ausbringungsmenge ermittelt, so ergeben sich mit $\beta = 11$ ZE bei serieller und paralleler Struktur die Produktmengen von 7000 Stck bzw. 7574 Stck. Im ähnlichen Verhältnis wie bei den Durchsätzen reduzieren sich die daraus resultierenden Produkt-

mengen erheblich mit der Schwankungsverstärkung. Deutlich verringert sich der Unterschied zwischen ihnen, vgl. Abb. 6.8.

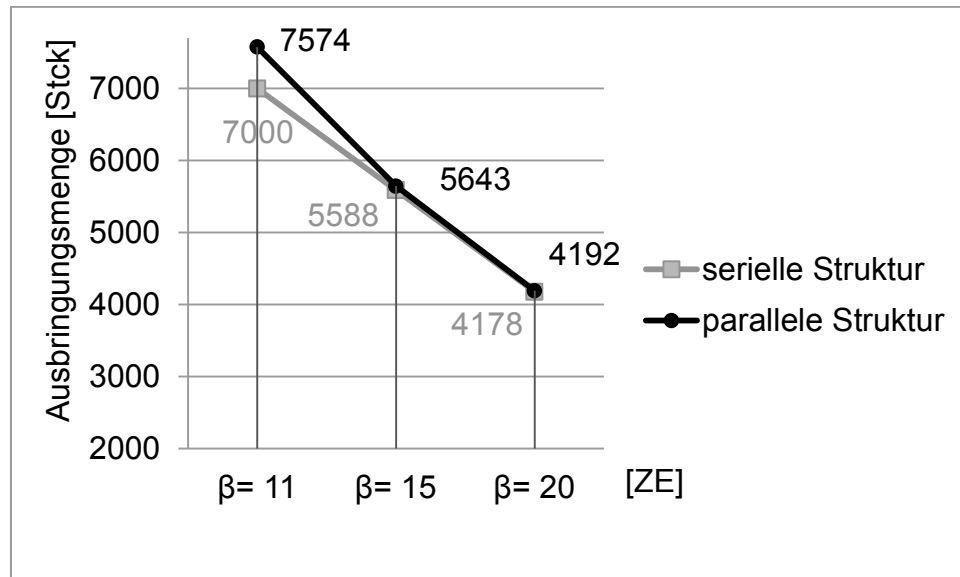


Abb. 6.8: Einfluss von Nachfrageschwankungen auf die Ausbringungsmenge bei der Untersuchungsdauer von 82851 ZE

Während sich mit $\beta = 20$ ZE bei serieller Struktur eine Produktmenge von 4178 Stck fertigen lässt, werden 4192 Stck in den beiden parallelen Linien produziert. Im Vergleich dazu können in jeweiliger paralleler Linie ca. $7574/2 = 3787$ Stck unter den Randbedingungen ($\beta = 11$ ZE und die mittleren Wartezeitanteile der Stationen S_{A1} und $S_{B1} \approx 10\%$, vgl. Abb. 6.7.a) gefertigt werden. Auf diese Weise wird anschließend das Modell mit paralleler Struktur so weiterentwickelt, dass mit $\beta = 20$ ZE nur eine parallele Linie (z.B. Linie A) benutzt wird. Das Simulationsergebnis stellt eindeutig dar, dass sich innerhalb des gegebenen Zeitraums von 82851 ZE und mit $\beta = 20$ ZE nur in der Linie A 4025 Stck fertigen lassen. Dabei beträgt der Durchsatz 0,0485 Stck/ZE. Dieser Wert ist kleiner als der gesamte Durchsatz der beiden Linien und größer als die Hälfte. Der Mengenunterschied zwischen den in serieller Struktur gefertigten Produkten (4178 Stck) und der Menge von 4025 Stck muss in der Linie B gefertigt werden. Anhand des Durchsatzes ihrer parallelen Linie A lässt sich die benötigte Durchlaufzeit der Linie B zur Fertigung einer Produktmenge von $(4178 - 4025 = 153$ Stck) wie folgt berechnen:

$$DLZ = \frac{153}{0,0485} = 3154 \text{ ZE}$$

Die mittleren Nutzungsgrade der Linien A und B betragen 88,72 % bzw. 3,37 %, vgl. Abb. 6.9. Das bedeutet auch, der mittlere Nutzungsgrad⁶² der in Betrieb genommenen Fertigungsanlage erhöht sich von 46,96 % bei serieller Struktur bis auf 88,72 % bei Linie A. Die Linie B bleibt ca. 96,3 % der geplanten DLZ stehen.

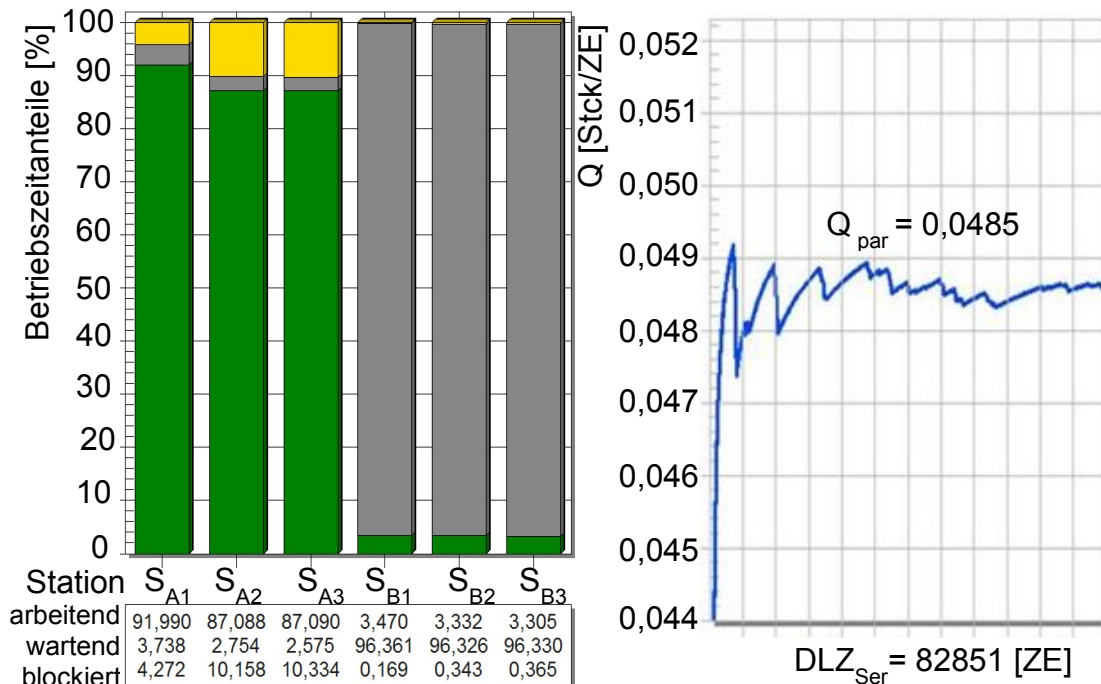


Abb. 6.9: Beispiel für das Betriebsverhalten der parallelen Struktur während eines Szenarios der Nachfrageschwankung (links), (rechts:) maximaler Durchsatz der jeweiligen parallelen Linie

Der Hauptvorteil der parallelen Struktur besteht hierbei darin, dass prinzipiell während solcher Nachfrageschwankung nur eine der beiden parallelen Linien fast die gesamten Fertigungsaufträge bearbeiten kann. In der Praxis würde man Linie B stillsetzen und die geringe Fehlmenge durch Mehrarbeit in Linie A abdecken. Dadurch weist die parallele Struktur in Hinsicht auf die Mitarbeiterkapazität und unter Berücksichtigung der gesamten Jahresarbeitszeit mehr Flexibilität auf. Weiterhin lassen sich die Betriebskosten erheblich reduzieren.

6.4.2 Stets vorhandene Aufträge (interne Einflussgröße)

Man unterstellt, dass an der ersten Station S_1 immer Erzeugnisse vorhanden sind und die fertigen Erzeugnisse an der letzten Station S_6 stets entsorgt werden. Das bedeutet, dass keine Nachfrageschwankung mehr zu untersuchen ist. Vielmehr

⁶² Die durchschnittlichen Nutzungsgradwerte lassen sich mithilfe der in Abb. 6.7 aufgezeigten Tabellen berechnen.

konzentriert sich die folgende Untersuchungsgruppe auf die Analyse interner Einflussgrößen. Wären die in der Abb. 6.3.e, f aufgeführten Zeitwerte in Sekunden anstatt (ZE) vorgeben, so entsprechen sie den in der Praxis bei automatisierten Anlagen typischen Stationsbearbeitungszeiten, die in Tab. 4.1 dargestellt werden. Auf diese Weise werden die Bearbeitungszeiten durch Sekunden ersetzt und wiederum in Abb. 6.10 dargestellt. Diese Annahme hilft künftig bei der Modellierung von Störungszeiten.

a) Stationsbearbeitungszeiten [s] (serielle Struktur, vgl. Abb. 6.3.e)							
S_k	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	T_v
T_{k1}	7	11	9	10	7	11	9,17
T_{k2}	11	8	11	7	4	11	8,67
T_{k3}	13	10	5	9	13	11	10,17
$T(S_k)$	9	10	9	9	7	11	

b) Stationsbearbeitungszeiten [s] (parallele Struktur, vgl. Abb. 6.3.f)				
S_k	S_{A1}, S_{B1}	S_{A2}, S_{B2}	S_{A3}, S_{B3}	T_v
T_{k1}	18	19	18	18,33
T_{k2}	19	18	15	17,33
T_{k3}	23	14	24	20,33
$T(S_k)$	19	18	18	

Abb. 6.10: Stationsbearbeitungszeiten in Sekunden

In ähnlicher Weise zum vorherigen Abschnitt werden hierbei 4000 Stck von v_1 , 2000 Stck von v_2 und 1000 Stck von v_3 gefertigt. Die Reihenfolgebearbeitung der Varianten ist ebenso stochastisch. Weiterhin geht man anfänglich von gleicher Behandlung der parallelen Linien aus, so dass die gleiche Erzeugnisanzahl jeder Variante in den jeweiligen parallelen Linien zu berücksichtigen ist.

Unter Berücksichtigung der oben erwähnten Randbedingungen werden zuerst die starren Strukturen untersucht. Obwohl die Bearbeitungszeiten der Stationen jeweils für jede Variante deterministisch angenommen werden, schwanken sie beim Variantenwechsel. Auf diese Weise lassen sich für die Stationen jeweils temporäre Engpässe bei Bearbeitung unterschiedlicher Varianten bilden. Der Soll-Durchsatz gleicht in diesem Beispiel dem Wert $Q_{\text{soll}} = 1/11 = 0,09 \text{ Stck/s} = 5,4 \text{ Stck/Min}$. Zur Fertigung von 7000 Stck ergibt sich für die serielle bzw. parallele starre Struktur eine $DLZ_{\text{ser}} = 1351$ bzw. $DLZ_{\text{par}} = 1177 \text{ Min}$, während der erreichte Durchsatz der seriellen Struktur $Q_{\text{ser}} = 5,18$ bzw. der parallelen Struktur $Q_{\text{par}} = 5,95 \text{ Stck/Min}$ beträgt, vgl. Abb. 6.11. Analog zur vorherigen Untersuchungsgruppe zeigen die Simulationsergebnisse eindeutig, dass der Durchsatz Q_{par} höher als Q_{soll} ist, während Q_{ser} kleiner als Q_{soll} ist. Die benötigte DLZ_{par} ist etwa 12,88 % kleiner als DLZ_{ser} . Das Betriebsverhalten dieser Modelle zeigt Abb. 6.12 an.

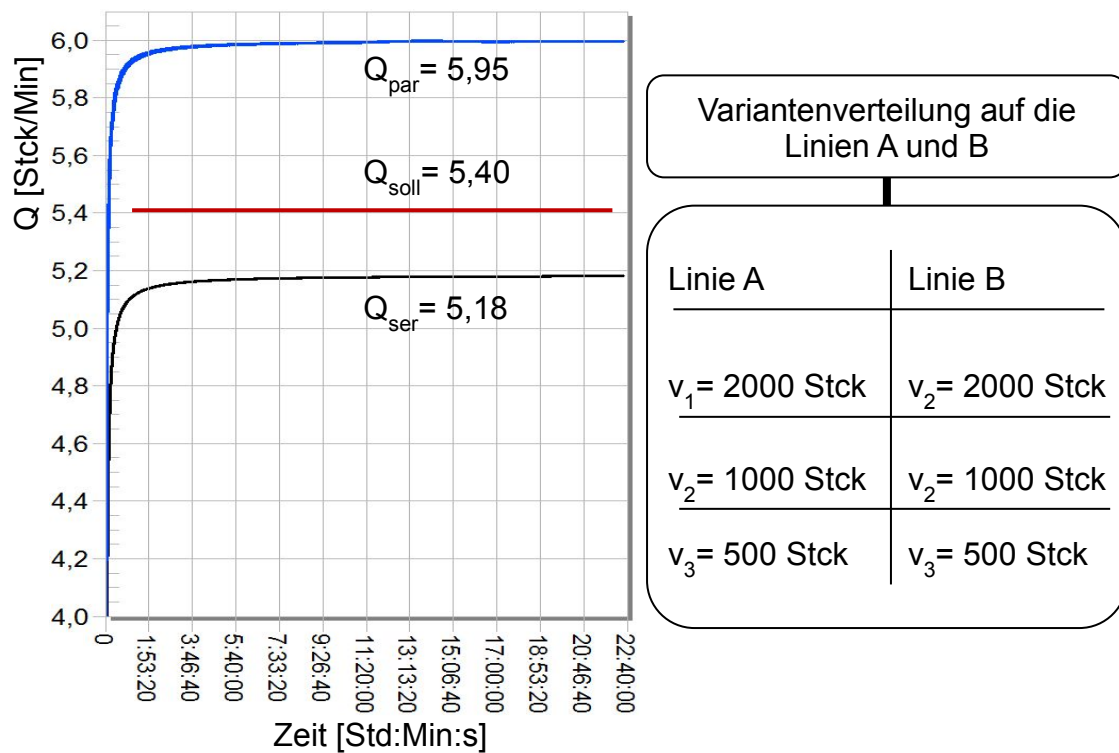


Abb. 6.11: Vergleich zwischen den Durchsätzen bei seriellen und parallelen Strukturen (links). Die Tabelle (rechts) zeigt die Menge gefertigter Varianten in den Linien A und B

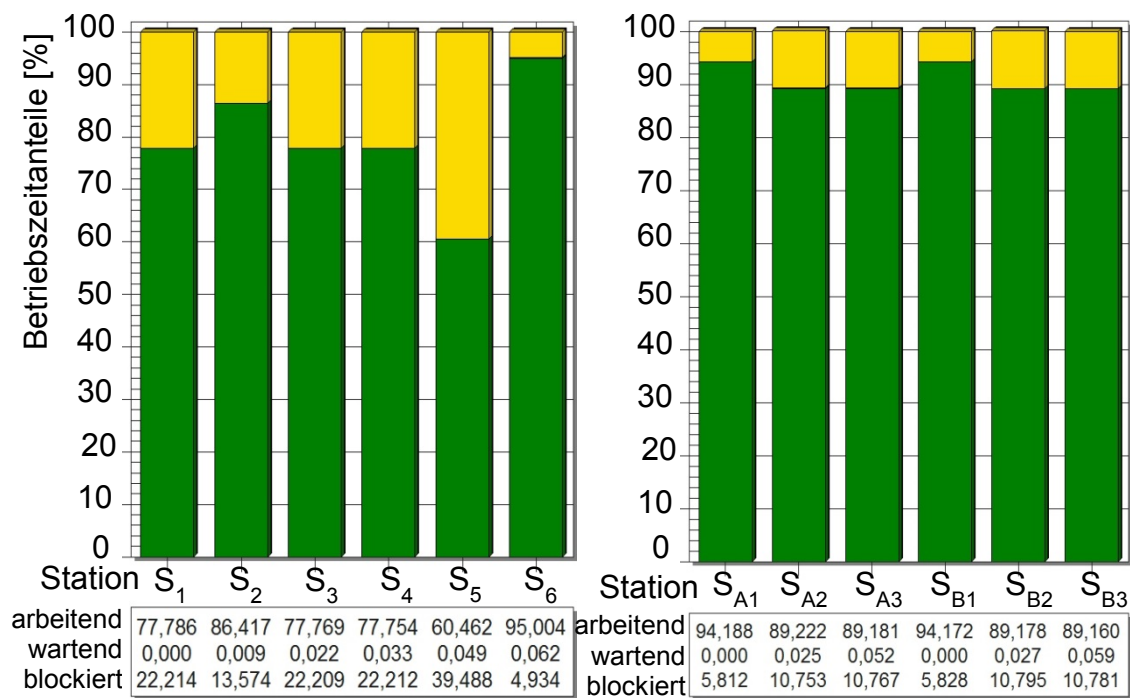


Abb. 6.12: Vergleich zwischen den Betriebszeitanteilen bei seriellen und parallelen Strukturen

Wegen der kontinuierlichen Versorgung entstehen keine Wartezeiten. Jedoch werden die Zeitverluste in allen Stationen in Form von Blockierzeiten angezeigt, trotz der Annahme, dass die letzte Station nie blockiert wird. Die Ursache dafür ist die Struktur der starren Verkettung (Warten auf das Ende der größten Bearbeitungszeit). Der mittlere Blockierzeitanteil bei serieller Struktur ist doppelt so hoch wie bei paralleler Struktur. Dadurch ist in Abb. 6.11 Q_{par} deutlich höher als Q_{ser} .

Die in Abb. 6.11 dargestellte Variantenverteilung zeigt, dass die Variante v_3 gleichmäßig in den parallelen Linien bearbeitet wird. Das bedeutet, die Stationen S_{A1} , S_{A3} , S_{B1} und S_{B3} bilden temporäre Engpässe bei der Bearbeitung der Variante v_3 . Die Entstehung dieser Engpässe kann aber zumindest teilweise vermieden werden, wenn die Gesamtmenge der Variante v_3 entweder in der Linie A oder B bearbeitet wird. Das heißt, die Varianten v_1 , v_2 und v_3 lassen sich in der Linie A fertigen, während nur die Varianten v_1 und v_2 in der Linie B bearbeitet werden. Dem entsprechend ergibt sich nach einem Simulationslauf eine neue Variantenverteilung: Linie A ($v_1 = 1513$, $v_2 = 774$ und $v_3 = 1000$ Stck), Linie B ($v_1 = 2487$, $v_2 = 1108$ und $v_3 = 0$ Stck). Abb. 6.13 stellt die daraus resultierenden Durchsätze jeweiliger paralleler Linie (links) und die Betriebszeitanteile (rechts) dar.

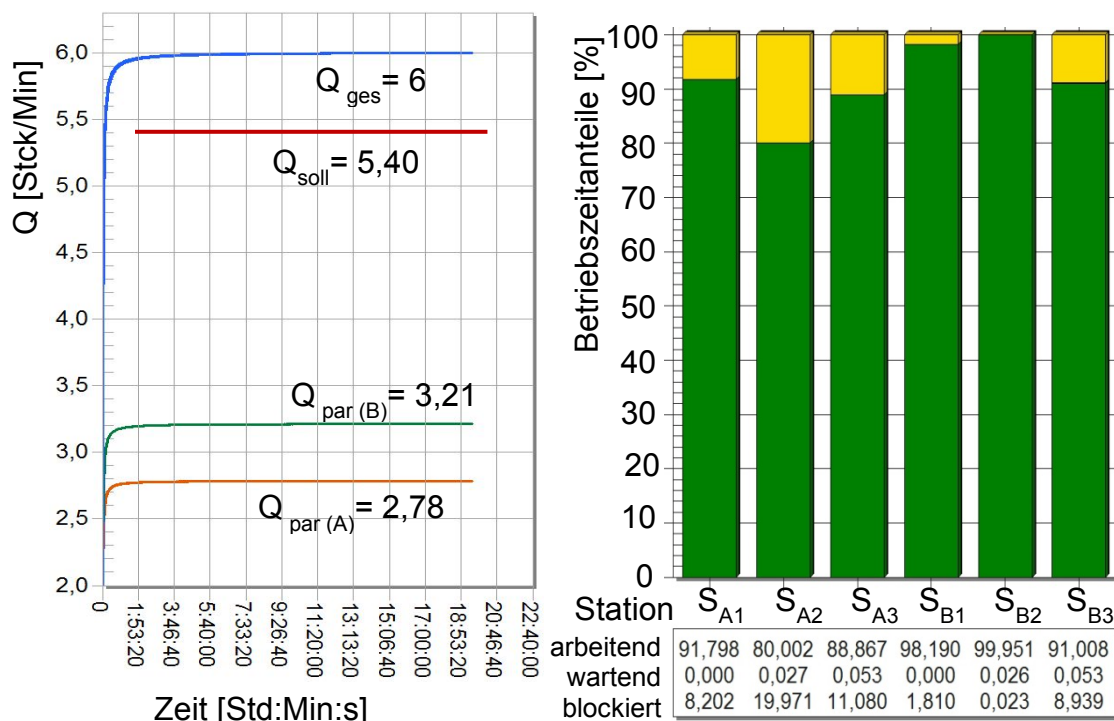


Abb. 6.13: Vergleich zwischen den Durchsätzen und Betriebszeitanteilen der parallelen Linie

Es ist dabei ersichtlich, dass bei paralleler Struktur der gesamte Durchsatz Q_{ges} bis auf 6 Stck/Min zunimmt. Vorteilhafterweise reduziert sich das Schwankungs-

intervall in der Linie B und deshalb erhöht sich der Stationsnutzungsgrad, dessen durchschnittlicher Wert von 90,83 % bis auf 96,38 % steigt. Im Gegensatz reduziert sich der durchschnittliche Stationsnutzungsgrad in der Linie A von 90,86 % bis auf 86,89 %. Insgesamt ergibt sich eine Erhöhung des durchschnittlichen Nutzungsgrades aller Stationen um etwa 0,78 % und deshalb reduziert sich die gesamte DLZ bis auf 70049 s.

Die Verbesserungen von Kenngrößen bei paralleler Struktur im Vergleich zur seriellen Struktur hängen hierbei von den Variantenanteilen und vor allem von den Bearbeitungszeitabweichungen der Varianten von der Taktzeit ab. Um dies näher zu untersuchen, wird eine weitere Untersuchungsreihe durchgeführt, in der individuell die DLZ und Durchsätze bei Fertigung einer Menge von 1000 Stck der jeweiligen Variante ermittelt bzw. verglichen werden.

Abb. 6.14 stellt die entsprechenden Ergebnisse dar. Bei der Fertigung von 1000 Stck von v_1 oder v_2 weist die parallele Struktur eine Reduzierung der DLZ um etwa 13,6 % im Vergleich zur seriellen Struktur auf, während sie für v_3 nur 7,7 % beträgt. Der Hauptgrund dafür ist der Unterschied zwischen der geplanten Taktzeit für die drei Varianten (11 s bei serieller und 22 s bei paralleler Struktur) und der tatsächlichen Linientaktzeit, wenn nur eine Variante in der Linie bearbeitet wird. Mit einer Reduzierung des Anteils von v_3 ist eine weitere Reduzierung der DLZ_{par} im Vergleich zu DLZ_{ser} zu erwarten.

Die aus der Analyse der Betriebszeitanteile entstehenden Blockierzeiten lassen sich teilweise durch die Entkopplung der Stationen durch Puffer reduzieren. Die Untersuchungsziele sind hierbei die optimalen Pufferkapazitäten zur Minimierung negativer Auswirkungen von Bearbeitungszeitschwankungen beim Variantenwechsel zu finden und die Änderung im Betriebsverhalten zu analysieren. Ausgehend von der Annahme, dass die Bearbeitungszeiten unregelmäßig zwischen drei deterministischen Werten wechseln, kann ein Pufferplatz zwischen je zwei benachbarten Stationen die Elastizität des Gesamtsystems erhöhen. Aufgrund der Simulationsergebnisse lässt sich festhalten, dass die Einrichtung eines Pufferplatzes zur Erhöhung der Durchsätze bei serieller und paralleler Struktur bis auf 5,45 bzw. 6,31 Stck/Min führt, vgl. Abb. 6.15. Eine weitere Erhöhung der Pufferkapazität bringt dabei aber keine Steigerung der Durchsätze mit sich. Allerdings kann erst die seriell elastische Fließlinie den geplanten Durchsatz überschreiten.

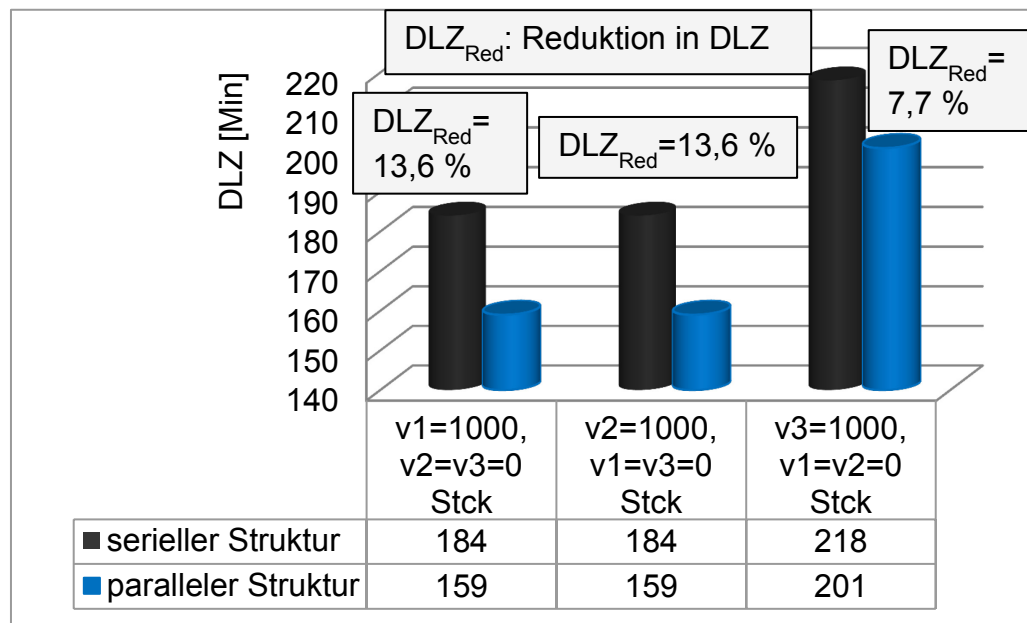


Abb. 6.14: Vergleich zwischen den Durchlaufzeiten bei individueller Fertigung von 1000 Stck jeweiliger Varianten

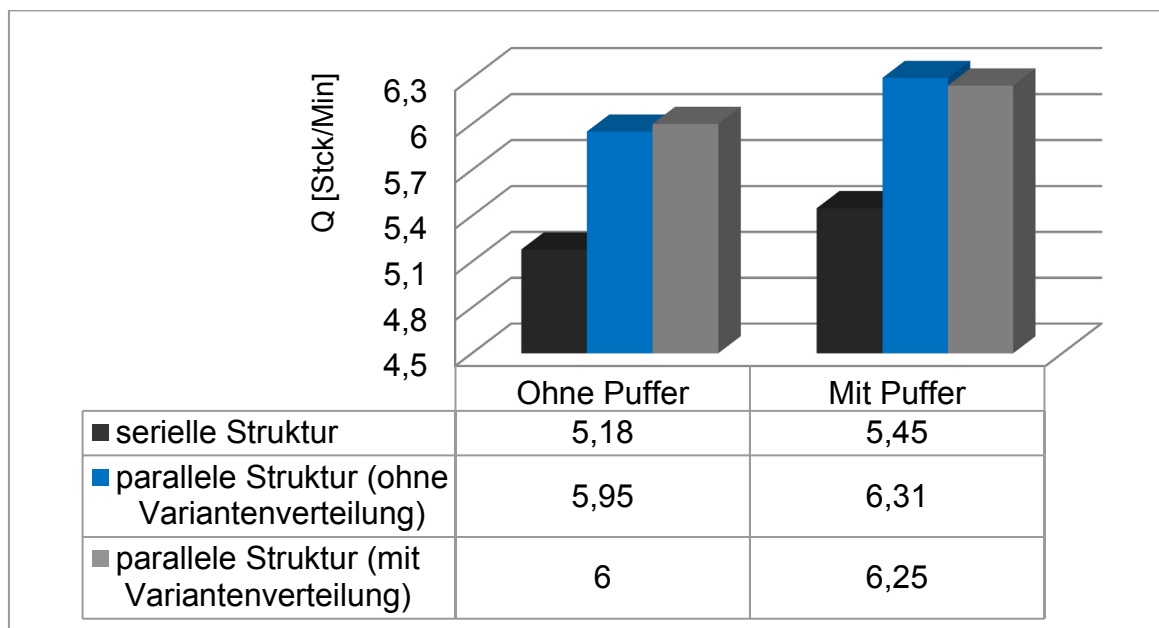


Abb. 6.15: Darstellung der gewonnenen Durchsätze bei elastischen Strukturen ($N_W = 1$ Pufferplatz)

Es ist weiterhin die Variantenverteilung zu analysieren. An dieser Stelle stellt sich die Frage, ob von Vorteil ist, die Variante v_3 nur in einer parallelen Linie (z.B. Linie A) zu fertigen. Dieses Szenario ist bei starrer Verkettung von Vorteil, denn die Varianten v_1 und v_2 können mit der Taktzeit von 19 s in der Linie B gefertigt werden, ansonsten wechselt die Taktzeit zwischen 19 und 24 s in den beiden Linien. Bei elastischer Verkettung beeinflussen die temporären Engpässe den Durchsatz

nicht im gleichen Verhältnis wie bei starrer Verkettung, da bei einem Blockierzustand eine Möglichkeit darin besteht, das schon bearbeitete Erzeugnis unabhängig von dem Zustand der nächsten Station in der Förderstrecke zu speichern und mit der Bearbeitung eines neuen Erzeugnisses zu beginnen. Aus diesem Grund lässt sich der Engpass einer Linie vielmehr durch die größte Stationtaktzeit $T(S_k)$ charakterisieren. Das bedeutet, die Wirkung der temporären Engpässe wird erheblich vermindert. Dadurch bilden die Stationen S_{A1} und S_{B1} die Engpässe in den Linien A und B und die Station S_6 in der seriellen Struktur, vgl. Abb. 6.10. Die Auswirkung der Engpasspositionen auf die Arten der Verlustzeiten zeigt Abb. 6.16 auf. Im Vergleich zu Abb. 6.12 lässt sich erkennen, dass bei elastischer Verkettung eine große Reduzierung der negativen Wirkungen des Engpasses auftritt.

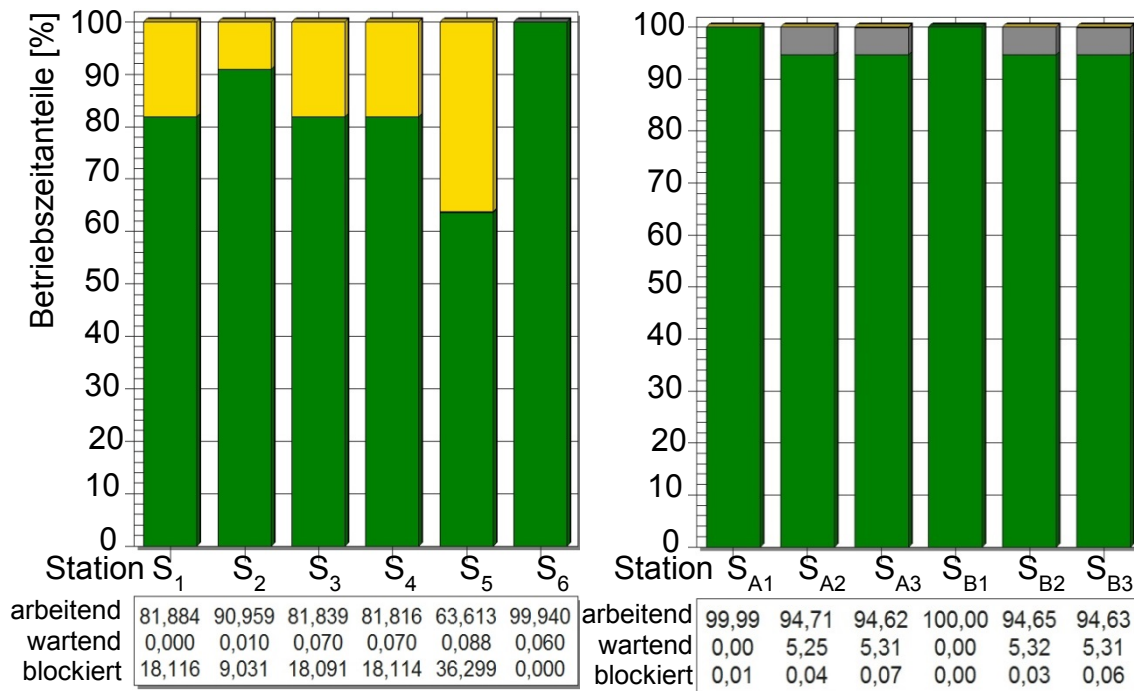


Abb. 6.16: Vergleich zwischen den Betriebszeitanteilen der elastischen Strukturen ($N_w = 1$ Pufferplatz)

Die Änderung in den Variantenanteilen führt grundsätzlich zur Änderung in den Stationtaktzeiten und deshalb zur Entstehung neuer Engpässe mit unterschiedlichen Abweichungswerten zu anderen Bearbeitungszeiten der Stationen in der Linie. Diese Überlegung erklärt, warum eine Realisierung der oben dargestellten Variantenverteilung bei elastischer paralleler Struktur den Durchsatz gegenüber der Struktur ohne Variantenverteilung etwas verschlechtert ($Q_{par} = 6,25$ Stck/Min), vgl. Abb. 6.15.

6.4.2.1 Störungswirkung

Die Stördauer charakterisiert einen entscheidenden Einflussparameter auf den Durchsatz. Störungsauswirkungen auf benachbarte Stationen können bei elastischer Verkettung erheblich reduziert werden. Um das Störverhalten zu untersuchen wird von Stationsverfügbarkeiten ($V_k < 100\%$) ausgegangen. Unter Berücksichtigung von typischen Störungsdauern und -verteilungen wird im Folgenden angenommen, dass die Störungsdauer exponentiell verteilt ist, ihre Werte unregelmäßig zwischen 10-360 s streuen und der Mittelwert 90 s beträgt. Diese Annahme gilt für die seriellen und parallelen Strukturen, vgl. Abb. 6.17.a.

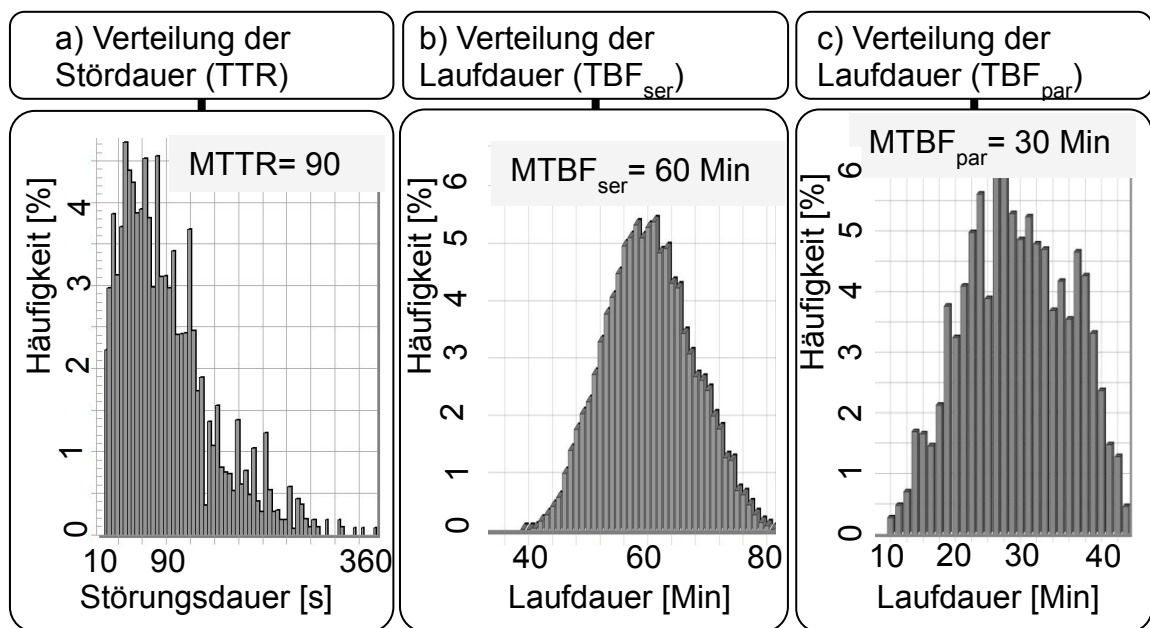


Abb. 6.17: Beispiele für die Verteilungswahrscheinlichkeiten der untersuchten Störungs- und Laufdauer

Bezüglich der Laufdauer stellt sich jedoch die Frage, ob die Stationen in der parallelen Struktur aufgrund ihrer zunehmenden Größen (Anzahl von Arbeitsgängen) und eventuell ihrer Komplexität häufiger gestört⁶³ sind als bei der seriellen Struktur. An dieser Stelle werden zwei „extreme“ Szenarien dargestellt und untersucht. Im ersten Szenario unterstellt man, dass sich die Störungsanzahl pro Station aufgrund der Halbierung der Stationsanzahl in der parallelen Linie und möglicher-

⁶³ Dabei wird angenommen, dass die Erhöhung der Störungshäufigkeit bei der parallelen Struktur von der Störungsursache abhängig ist, vgl. die Ursachen für die Störungsentstehungen im Abs. 4.1.3.1. Wenn beispielsweise Störungen nur in der Zuführungseinrichtung auftreten, kann die Vergrößerung des Stationsinhalts keine Effekte auf die Störungshäufigkeit haben. Allerdings findet man in der Fachliteratur kaum Aussagen, die die Zusammenhänge zwischen den Stationsgrößen und den Störungshäufigkeiten bzw. -wirkungen darstellen.

weise⁶⁴ der Verdopplung der Anzahl von Arbeitsgängen in jeder Station verdoppelt. Auf diese Weise kann man sich eine Halbierung der Laufdauer in jeder Station vorstellen. Ist dabei die Laufdauer (TBF_{ser}) bei serieller Struktur erlangverteilt, wobei deren Werte zwischen 40-80 Min streuen und der Mittelwert $MTBF_{ser} = 60$ Min ist, so lassen sich bei paralleler Struktur diese Annahmen treffen: $TBF_{par} = 10-40$ Min (erlangverteilt) und $MTBF_{par} = 30$ Min. Die allgemeinen Untersuchungsdaten des ersten Szenarios werden in Abb. 6.18 zusammengefasst.

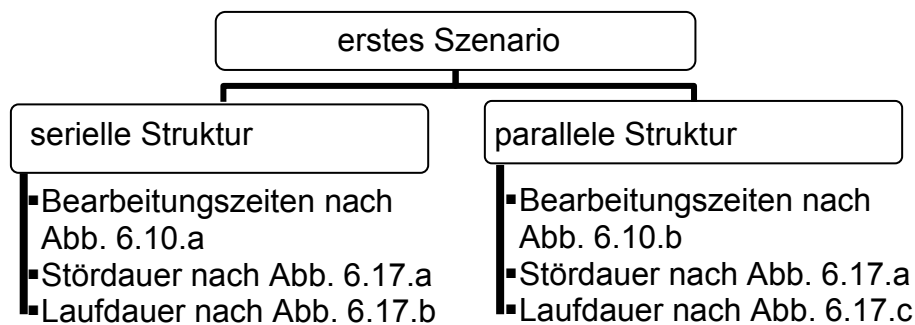


Abb. 6.18: Allgemeine Untersuchungsdaten des ersten Szenarios

Im zweiten Szenario wird anfänglich zwar diese Annahme der Laufdauer beibehalten, wobei aber die mittleren Bearbeitungszeiten der Stationen im jeweiligen Modell gleich sind. In einer weiteren Untersuchungsreihe wird davon ausgegangen, dass bei den beiden Strukturen die Stationen gleiche mittlere Bearbeitungszeiten, Störungs- und Laufdauer haben (vgl. Abb. 6.24).

Beachtet man die oben dargestellten Annahmen für das erste Szenario, so kann man die einzelnen Stationsverfügbarkeiten mithilfe der im Abs. 4.1.1 erwähnten Formel (4.5) berechnen. Also ergibt sich eine Stationsverfügbarkeit $V_{k,ser} = 97,6$ % bei der seriellen Struktur und $V_{k,par} = 95,23$ % bei der parallelen Struktur.

Sind diese Stationen starr verkettet, so reduzieren sich ihre Verfügbarkeiten und Nutzungsgrade, denn die Störungen wirken sich nicht nur lokal, sondern auch auf alle Stationen aus. Zum Vergleich mit den ursprünglichen Werten (ohne Verkettung) werden die Gesamtverfügbarkeit und der -nutzungsgrad nach der Verkettung mithilfe der Formel (4.8) bzw. (4.9) ermittelt. Dadurch reduziert sich die Gesamtverfügbarkeit bei der seriellen Struktur ($V_{Sy, ser}$) bis auf 96.16 % und bei der parallelen Struktur ($V_{Sy, par}$) bis auf 93,71 %, vgl. Abb. 6.20.b ($N_w = 0$).

⁶⁴ Diese Annahme wird zur Vereinfachung angenommen. In diesem Beispiel werden aber die Inhalte der zwei direkt benachbarten Stationen (S_1 und S_2 , S_3 und S_4 , S_5 und S_6) zusammengefasst, d.h. der neue Inhalt der kombinierten Station ist nicht unbedingt verdoppelt.

Des Weiteren findet wegen der starren Verkettung eine signifikante Reduzierung des Gesamtnutzungsgrades⁶⁵ (N_{Sy}) statt, vgl. Abb. 6.19 und Abb. 6.12. Eine Reduzierung der Stationsverfügbarkeit um ca. 2,44 % bei serieller Struktur verursacht eine Abnahme des $N_{Sy, ser}$ um etwa $(79,19 - 67,61 = 11,58 \%)$, während bei der parallelen Struktur eine Reduzierung der Stationsverfügbarkeit um ca. 4,77 % eine Abnahme des $N_{Sy, par}$ um etwa $(90,85 - 77,91 = 12,94 \%)$ verursacht, d.h., die Störungen haben einen großen Einfluss auf den Nutzungsgrad. Sie wirken sich bei der seriellen Struktur stärker aus. Diese Aussage lässt sich dadurch erklären, dass die Stationsanzahl in einer starr verketteten Linie einen bedeutenden Einfluss auf die Höhe des insgesamt auftretenden Verkettungsverlustes hat.

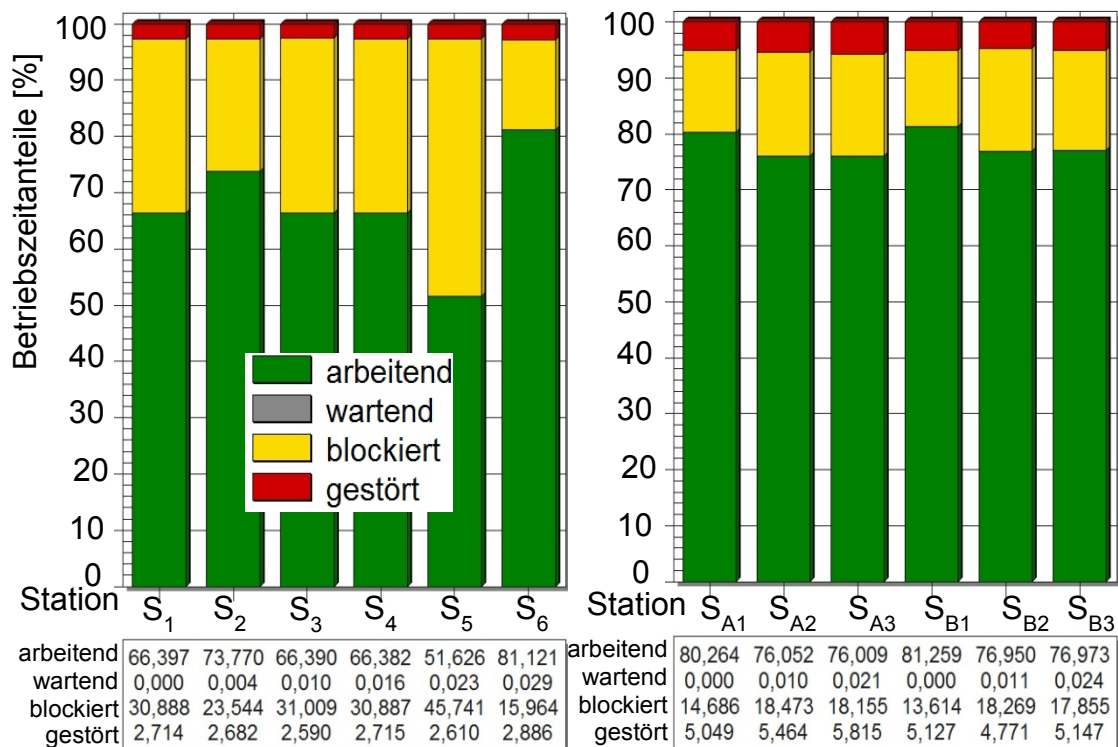


Abb. 6.19: Vergleich zwischen den Betriebszeitanteilen bei starr seriellen und parallelen Strukturen unter Beachtung von Störungsentstehungen nach dem ersten Szenario

In der folgenden Untersuchungsreihe werden 20 Simulationsexperimente geplant. In jedem Experiment werden die Kapazitäten der Puffer jeweils um einen Pufferplatz erhöht. Weiterhin sind die Startwerte der Zufallszahlenströme zu ändern, um unterschiedliche Erzeugungen von Bearbeitungszeitwerten zu erlauben. Die Folge

⁶⁵ Unter Berücksichtigung der Fußnote 61, entspricht der Gesamtnutzungsgrad dem mittleren Nutzungsgrad aller Stationen im Fließsystem.

davon sind ebenso unterschiedliche Werte von Durchsätzen. Die sich daraus ergebenden Durchsatzkurven (Mittelwerte) werden in Abb. 6.20.a dargestellt, wobei zusätzlich zu Mittelwerten die maximalen und minimalen Werte angezeigt sind. Wie schon aus der Fachliteratur zu erwarten, zeigen die Simulationsergebnisse eindeutig, dass sich bei elastischer Verkettung und mit der Erhöhung von Pufferkapazitäten die Verkettungsverluste erheblich reduzieren und sich dadurch der Durchsatz erhöht. Es ist dabei ersichtlich, dass sich mit der Erhöhung der Pufferkapazitäten von 1 bis ca. 11 Pufferplätzen die Durchsätze in den beiden Strukturen ständig erhöhen. Die Erweiterung der Pufferkapazitäten über 12 Pufferplätze hinaus bringt jedoch eine allenfalls geringe oder fast keine Verbesserung des Durchsatzes bei den beiden Strukturen mit sich.

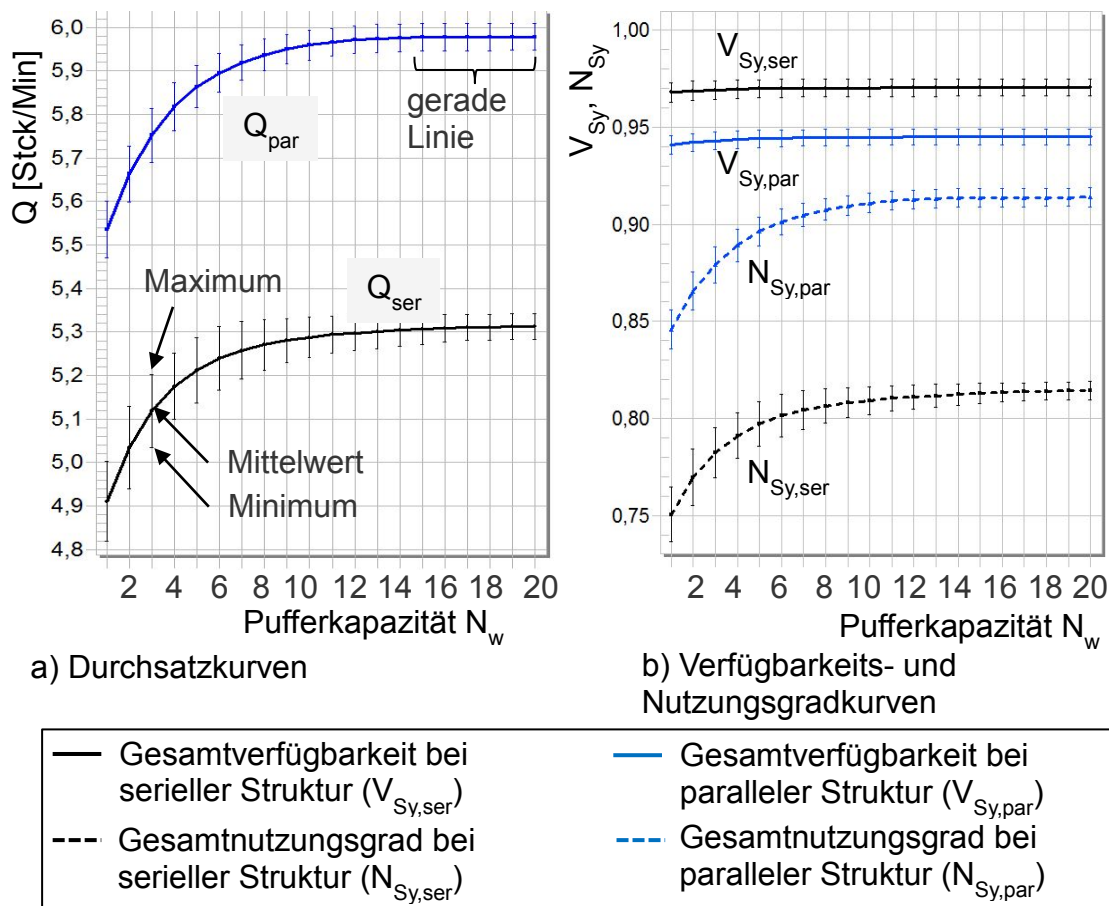


Abb. 6.20: Puffereinfluss auf den Durchsatz und die Gesamtverfügbarkeiten und -nutzungsgrade

Obwohl die Stationen in der parallelen Struktur geringere Verfügbarkeitswerte besitzen, ist der Durchsatz dort signifikant höher als bei der seriellen Struktur (ca. 13 %). Um diese Ergebnisse zu erläutern, wird der Einfluss der Erhöhung von Pufferplätzen auf die Gesamtverfügbarkeit und den -nutzungsgrad dargestellt, vgl. Abb. 6.20.b. Es ergibt sich eine geringe Erhöhung der Verfügbarkeitswerte mit der

Erhöhung der Pufferkapazitäten. Eindeutig ist aber die Steigerung der Nutzungsgradwerte zu erkennen. Dank dieser Steigerung erhöhen sich die Durchsätze in ähnlicher Relation.

Eine weitere Betrachtung der Betriebszeitanteile der Engpässe (S_6 , S_{A1} und S_{B1}) zeigt, dass in diesen Stationen fast keine Blockier- oder Wartezeitanteile auftreten. Die Störungen von Nicht-Engpässen wirken sich in diesem Fall wegen der optimierten Stationsentkopplung kaum auf die Engpassstationen aus, vgl. Abb. 6.21.

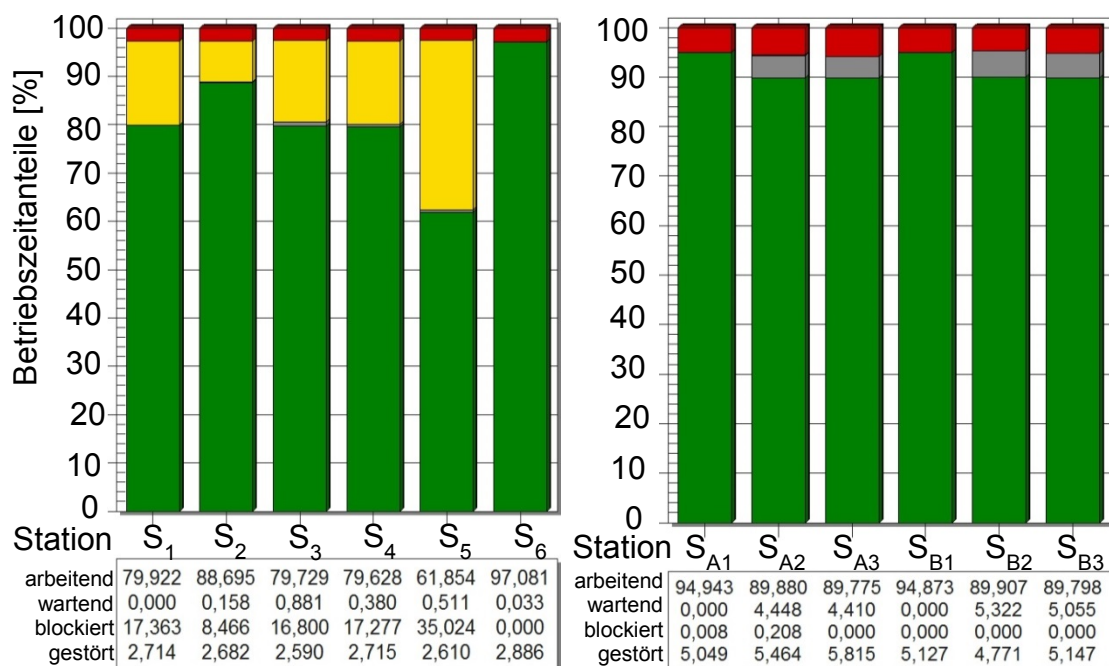


Abb. 6.21: Vergleich zwischen den Betriebszeitanteilen unter Beachtung von Störungsentstehungen ($N_w = 18$ Pufferplätze)

Diese zwei Modelle bieten des Weiteren die Möglichkeit an, zwei Positionen von Engpässen in den Linien zu untersuchen. Der Engpass, der am Ende der Linie bei der seriellen Struktur liegt, führt dazu, dass die Vorgänger meist blockiert und die Puffer häufig voll belegt sind. Wenn eine dieser Stationen gestört ist, können die Nachfolger von Zugangspuffern jeweils mit Erzeugnissen bestückt werden. Bei der parallelen Struktur spielt diese Engpassposition (Am Anfang der Linien) eine negative Rolle bei der Befüllung der nachstehenden Puffer.

Die weitere Erhöhung von Pufferkapazitäten (ab 15 Pufferplätze, vgl. Abb. 6.20.a) bewirkt hier keine Reduzierung von Warteanteilen. Es ist bemerkenswert, dass potenziell bei der seriellen bzw. parallelen Struktur die temporären Engpässe eine

positive,⁶⁶ jedoch in vielen Fällen eine auch negative Rolle bei der Entleerung oder Befüllung der Puffer spielen. Die Häufigkeiten der Pufferinhalte im Fall von Pufferkapazitäten von z.B. 18 Pufferplätzen zeigt Abb. 6.22.

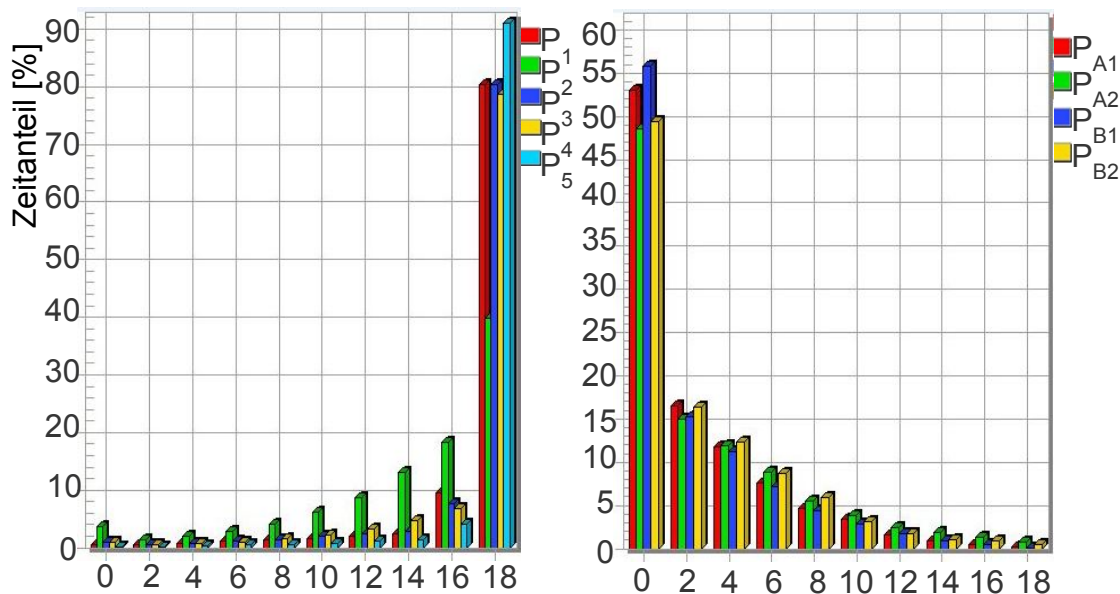


Abb. 6.22: Wahrscheinlichkeiten der Häufigkeiten von Pufferinhalten bei zwei unterschiedlichen Engpasspositionen

Variierung der Stördauer

Um den Einfluss von Stördauern zu erweitern, werden die folgenden konstanten Stördauerwerte 70, 80, 90, 100, 110, 120 bzw. 130 s bei starrer und elastischer Verkettung untersucht, vgl. Abb. 6.23.

Wie nach den Formeln (4.5) und (4.9) bekannt ist, verschlechtert sich die Verfügbarkeit mit der Erhöhung der Stördauer. Dabei ist leicht ersichtlich, dass diese Verschlechterung aufgrund der dargestellten Annahme der Laufdauerverteilung (vgl. Abb. 6.17.c) bei paralleler Struktur eindeutiger ist.

Vergleicht man die unterschiedlichen Kurvenneigungen und die Abstände zwischen den Kurven, so lässt sich das Folgende zusammenfassen:

- Verfügbarkeitskurven: Mit der Erhöhung von Stördauern verschlechtern sich die Verfügbarkeitswerte bei starrer Verkettung stärker als bei elastischer Verkettung.

⁶⁶ Das kann sich positiv auf das Gesamtsystem auswirken, wenn in einem bestimmten Zeitraum auf einer Station mehr als eine Störung entsteht und zugleich im gleichen Zeitraum die direkten Vorgänger und/oder Nachfolger niemals gestört sind.

- Nutzungsgradkurven:
 - Schon eine kleine Verschlechterung der Stationsverfügbarkeit führt zur großen Reduzierung der Nutzungsgradwerte bei starrer Verkettung (die Kurven der Nutzungsgrade fallen stärker ab als die der Verfügbarkeitswerte).
 - Bei elastischer Verkettung spielt das gute Befüllungsverhalten von Puffern eine positive Rolle und mildert die Reduzierung der Nutzungsgradwerte bei serieller Struktur.
- Eine große Verbesserung der Gesamtverfügbarkeit bei der parallelen Struktur im Vergleich zur seriellen Struktur ist zu erwarten, wenn die Störungshäufigkeiten bei beiden Strukturen gleich angenommen werden, d.h. wenn die in Abb. 6.17.b angezeigte Laufdauerverteilung für die beiden Strukturen gültig ist. Mit dieser Annahme ist eine erhebliche Erhöhung des Gesamtnutzungsgrades bei der parallelen Struktur zu erwarten.

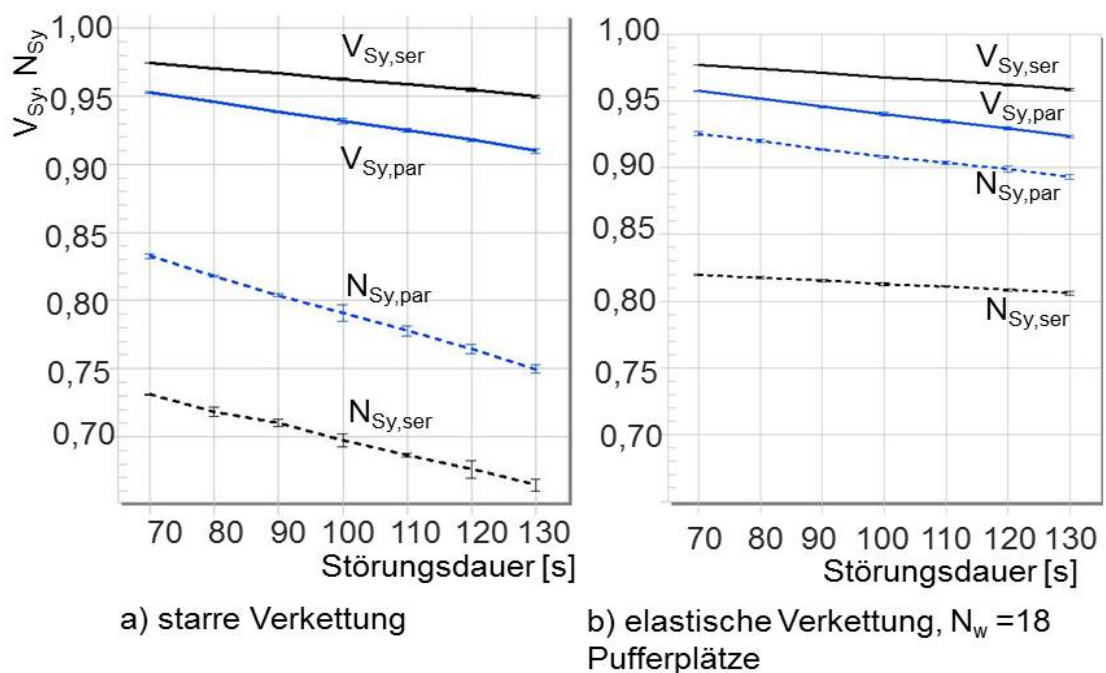


Abb. 6.23: Einfluss von Stördauern auf die Gesamtverfügbarkeit und den -nutzungsgrad bei starrer und elastischer Verkettung

Gleiche Stördauer aber unterschiedliche Laufdauer (zweites Szenario)

Anschließend wird das oben erwähnte zweite Szenario untersucht, wobei die geplanten Taktzeiten (11 s) bei der seriellen Struktur und in der jeweiligen parallelen Linie (22 s) zu modellieren sind. Für diesen Zweck wird angenommen, dass in jedem Modell alle Stationen die gleiche mittlere Bearbeitungszeit (Taktzeit) haben,

d.h. es wird dabei davon ausgegangen, dass es keine Engpässe gibt. Es wird zwischen zwei Fällen unterschieden. Die Annahme der Laufdauerverteilung bei der parallelen Struktur, die in Abb. 6.17.c dargestellt wird, hält man im ersten Fall (unterschiedliche Laufdauer) ein. Demgegenüber entfällt sie im zweiten Fall (gleiche Laufdauer), vgl. Abb. 6.24.

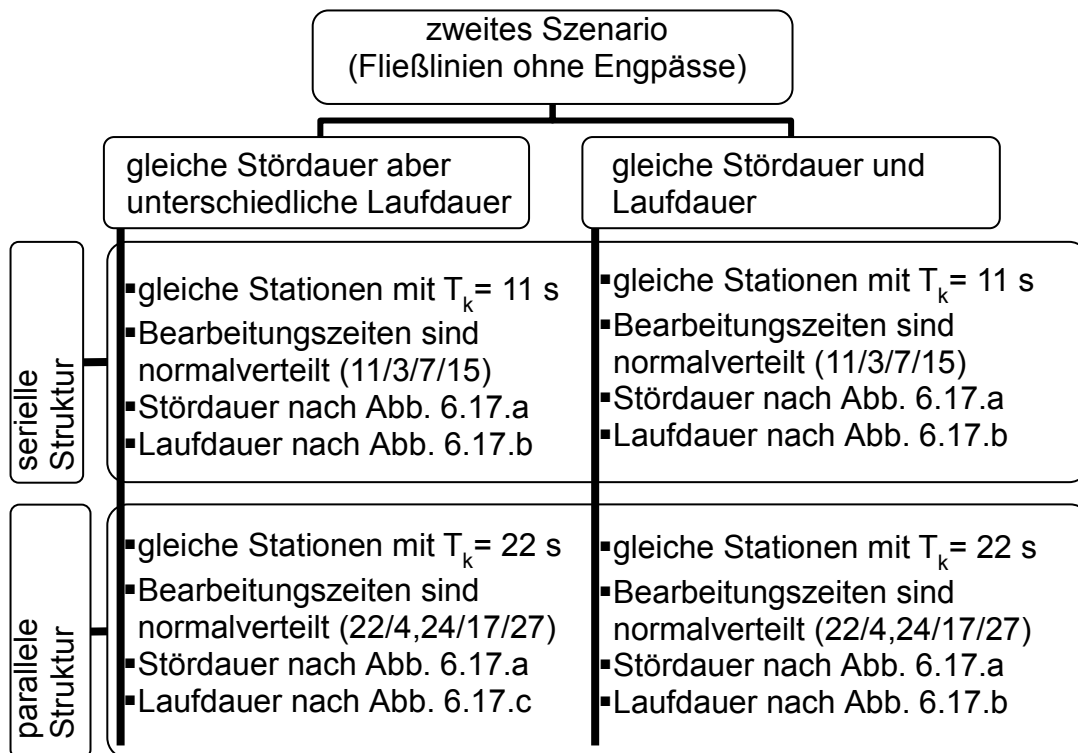


Abb. 6.24: Untersuchungsplan des zweiten Szenarios

Zur Vereinfachung geht man hierbei von normalverteilten⁶⁷ Bearbeitungszeiten aus, wobei bei serieller Struktur der Mittelwert 11 s, die Standardabweichung 3 s und die untere bzw. obere Schranke 7 bzw. 15 s sind. Diese Kombination aus Zeitwerten wird in der Form (11/3/7/15 s) dargestellt. Für die parallele Struktur gilt (22/4,24/17/27 s)⁶⁸. Das Ziel dieser Untersuchungsreihe ist, die beiden Fließsysteme bei Vernachlässigung von Engpässen zu untersuchen.

⁶⁷ Die Annahme, dass Störungen auf den Stationen auftreten und die Bearbeitungszeiten schwanken, entspricht hybriden Fließlinien, wobei eine Kombination von Menschen und Maschinen in jeder Station stattfindet. Deshalb wird dabei angenommen, dass die aus diesen Untersuchungen resultierenden Aussagen auch für hybride Fließlinien geeignet sind. Trotzdem ist in der Praxis aus physischen Gründen zu erwarten, dass grundsätzlich manuelle Tätigkeiten länger als automatisierte dauern.

⁶⁸ Der Standardabweichungswert berechnet sich nach der Faltungsregel von zwei Normalverteilungen, vgl. Formel (6.3).

Werden die Pufferkapazitäten jeweils gleichzeitig in den beiden Strukturen um einen Pufferplatz pro Experiment erhöht, so werden die Verfügbarkeits-, Nutzungsgrad- und Durchsatzkurven in Abb. 6.25 dargestellt.

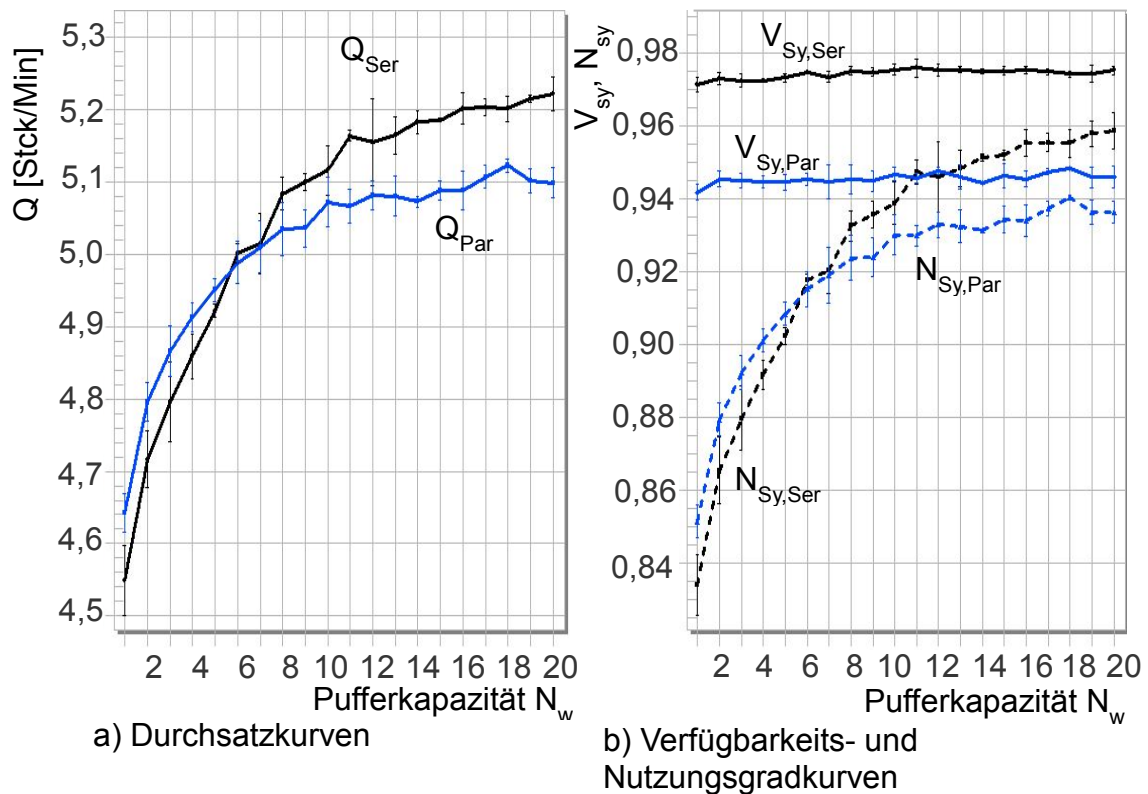


Abb. 6.25: Puffereinfluss auf den Durchsatz und die Gesamtverfügbarkeiten und -nutzungsgrade (Fließlinien ohne Engpässe, unterschiedliche Laufdauer)

Auffällig ist dabei die Zunahme der Nutzungsgradwerte und der Durchsätze mit der Erhöhung der Pufferkapazitäten. Bemerkenswert ist hier die Ähnlichkeit der Kurvenverläufe der Nutzungsgrad- und Durchsatzkurven. Bei niedrigen Pufferkapazitäten (1-5 Pufferplätze) ist der Q_{par} größer als der Q_{ser} . Danach bringt die Erhöhung der Pufferkapazitäten bei serieller Struktur mehr Vorteile bezüglich der Nutzungsgrad- und Durchsatzwerte im Vergleich zur parallelen Struktur.

Die Analyse der Betriebszeitanteile zeigt bei z.B. 5 Pufferplätzen fast gleiche Nutzungsgrade bei den beiden Strukturen. Die Summe der Anteile von Verlustzeiten ist also nahezu gleich, während die Anteile der Blockier- und Wartezeiten (Verkettungsverluste) bei der seriellen Struktur jedoch höher sind als bei der parallelen Struktur, vgl. Abb. 6.26, da sich die Verkettungsverluste in Summe proportional zur Stationsanzahl ergeben.

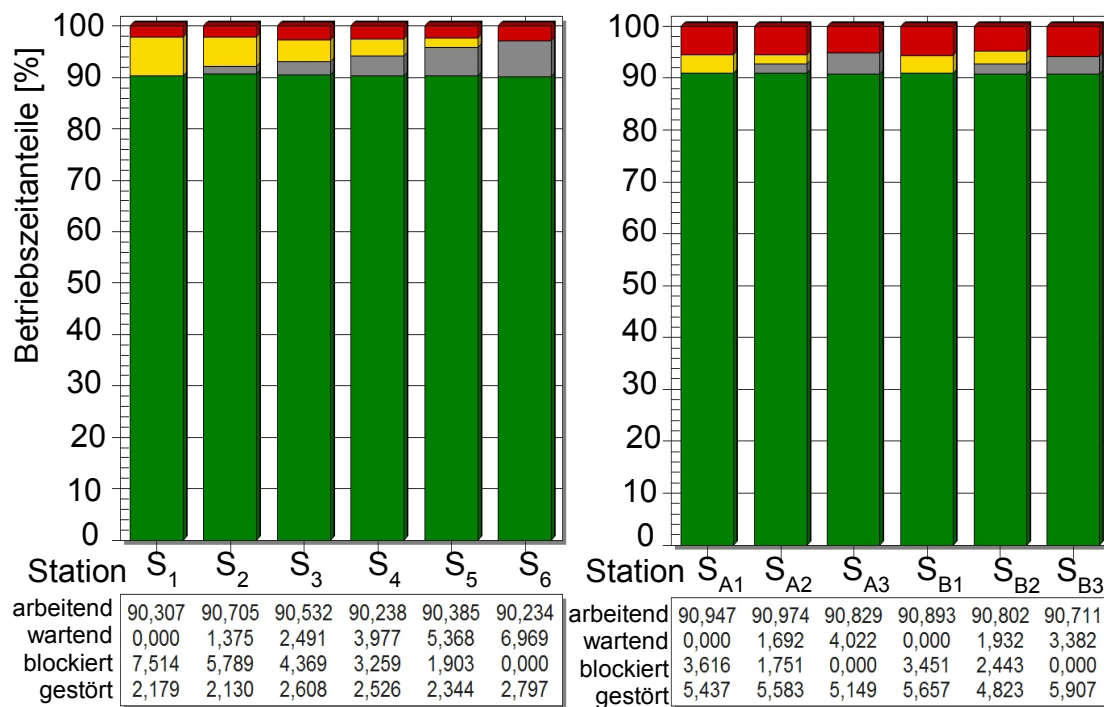


Abb. 6.26: Vergleich zwischen den Betriebszeitanteilen im Fall einer gleichen Stördauer (Fließlinien ohne Engpässe, $N_w = 5$ Pufferplätze, unterschiedliche Laufdauer)

Da die Funktion der Puffer in diesem Fall die Reduzierung dieser Verkettungsverluste ist, kann die Erhöhung der Pufferkapazitäten in der seriellen Struktur die Stationsnutzungsgrade und deshalb den Durchsatz weiter steigern. Je mehr die Fließlinien Verkettungsverluste aufweisen, desto deutlicher ist der Puffereinfluss.

Gleiche Stördauer und Laufdauer (zweites Szenario)

Unter der Annahme, dass das Verhalten der Laufdauer in beiden Strukturen gleich ist, werden die im vorherigen Abschnitt dargestellten Untersuchungen erneut durchgeführt. Im Vergleich zu vorherigen Untersuchungsreihen wird dabei auf die Einflüsse von Engpässen bzw. ihren Positionen und vor allem auf den angenommenen Unterschied zwischen den Stationsverfügbarkeiten in den beiden Strukturen verzichtet. Mit anderen Worten konzentriert sich diese Untersuchungsreihe vielmehr auf die Einflüsse der Linienlänge auf die Verkettungsverluste, Nutzungsgrade und Durchsätze.

Die erste Aussage dieser Untersuchungen lässt sich so ausdrücken, dass bei gleichem Verhalten von Stör- und Laufdauern die beiden Fließsysteme fast gleiche Verfügbarkeitswerte aufweisen, die sich kaum mit der Steigerung der Pufferkapazitäten erhöhen, vgl. Abb. 6.27.b. Im Gegensatz dazu ist der Unterschied zwischen den Nutzungsgraden deutlich.

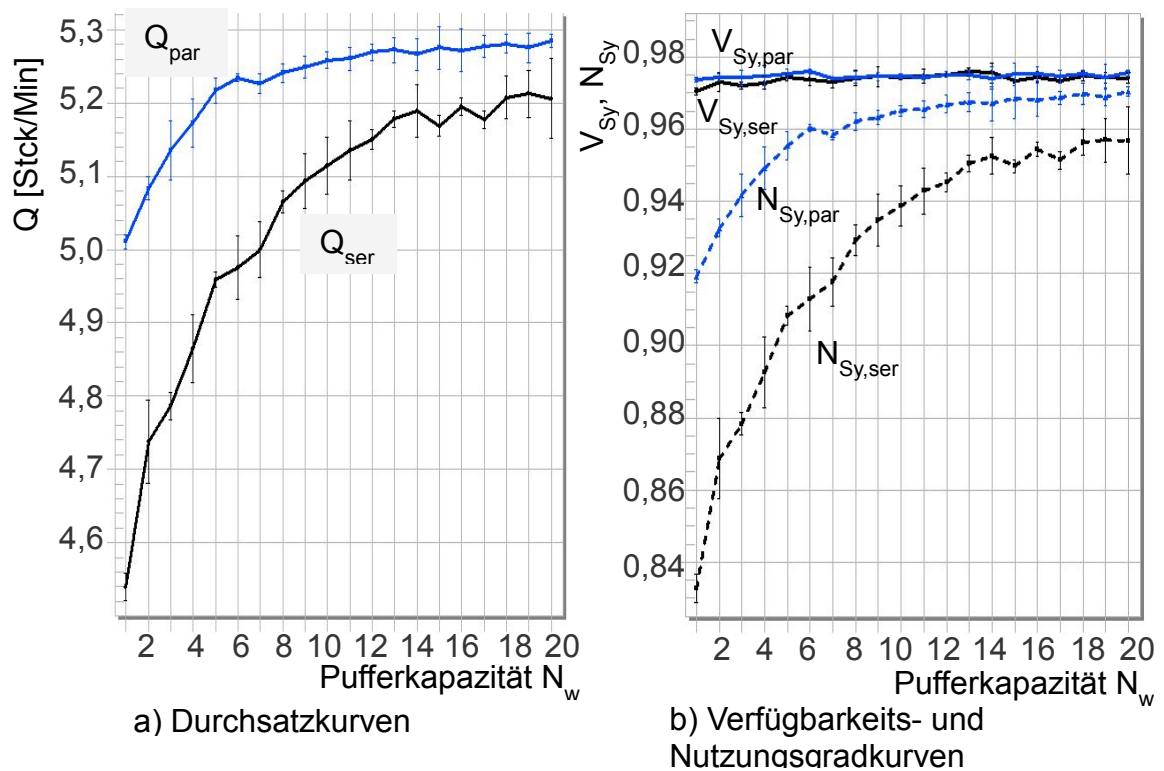


Abb. 6.27: Puffereinfluss auf den Durchsatz, die Gesamtverfügbarkeiten und -nutzungsgrade bei gleichen Stör- und Laufdauern (Fließlinien ohne Engpässe)

Bei Pufferkapazitäten von einem Pufferplatz weist die parallele Struktur einen mittleren Durchsatz von etwa 5 Stck/Min auf, der um etwa 10 % höher als bei der seriellen Struktur liegt. Dieser Unterschied reduziert sich mit der Steigerung der Pufferkapazitäten bis auf etwa 2 % bei $N_w = 20$ Pufferplätze. Die Beziehung zwischen den Pufferkapazitäten und Durchsätzen stellt Abb. 6.27.a dar. Die weitere Erhöhung der Pufferplätze in der seriellen Struktur sollte zum gleichen Durchsatz ($Q_{ser} \approx Q_{par}$) führen. Das könnte erreicht werden, wenn die Stationsnutzungsgrade in den beiden Strukturen nahezu gleich sind, vgl. Abb. 6.28.

Variierung der Stördauer (zweites Szenario)

Wird von 20 Pufferplätzen ausgegangen und die Stördauerwerte von 70, 80, 90, 100, 110 bzw. 120 s untersucht, so ergeben sich die Kennlinien der Fließsysteme in Abb. 6.29. Mit der kleinsten Stördauer (70 s) entstehen fast keine Verkettungsverluste bei paralleler Struktur. Dadurch sind weiterhin die Verfügbarkeits- und Nutzungsgradwerte in diesem Fall gleich. Die Fähigkeit der Puffer eine Stördauer vollständig zu entkoppeln, verringert sich aber mit der Erhöhung der Stördauer.

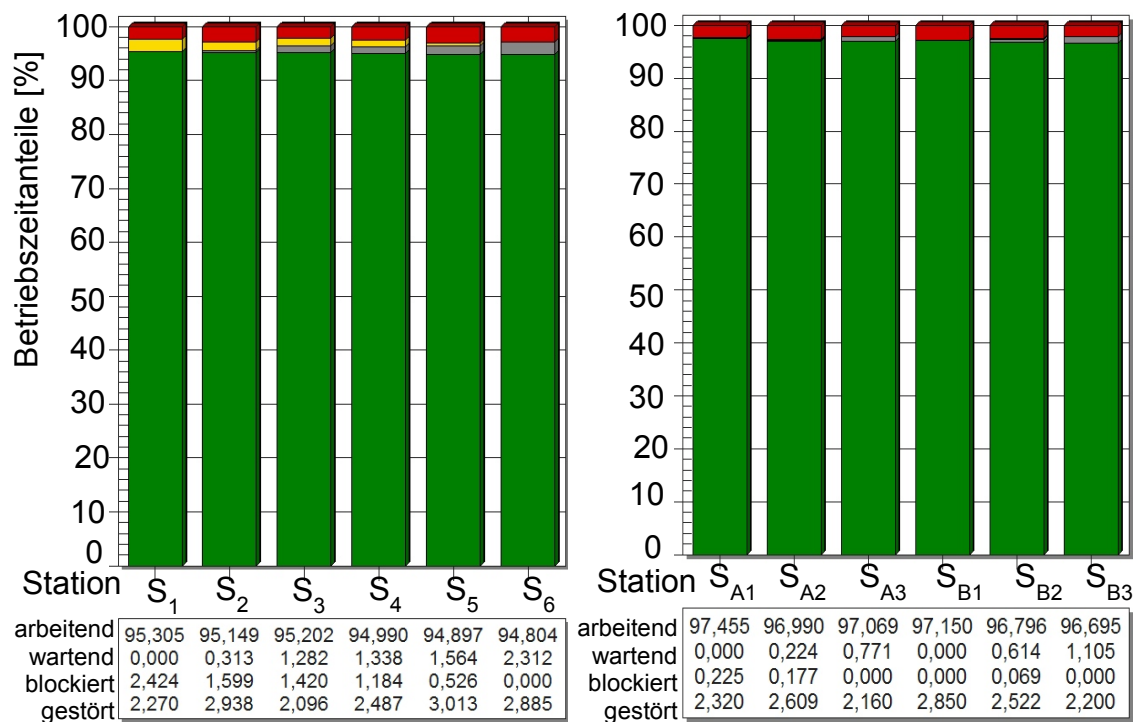


Abb. 6.28: Vergleich zwischen den Betriebszeitanteilen im Fall einer gleichen Stör- bzw. Laufdauer (Fließlinien ohne Engpässe, $N_w = 20$ Pufferplätze)

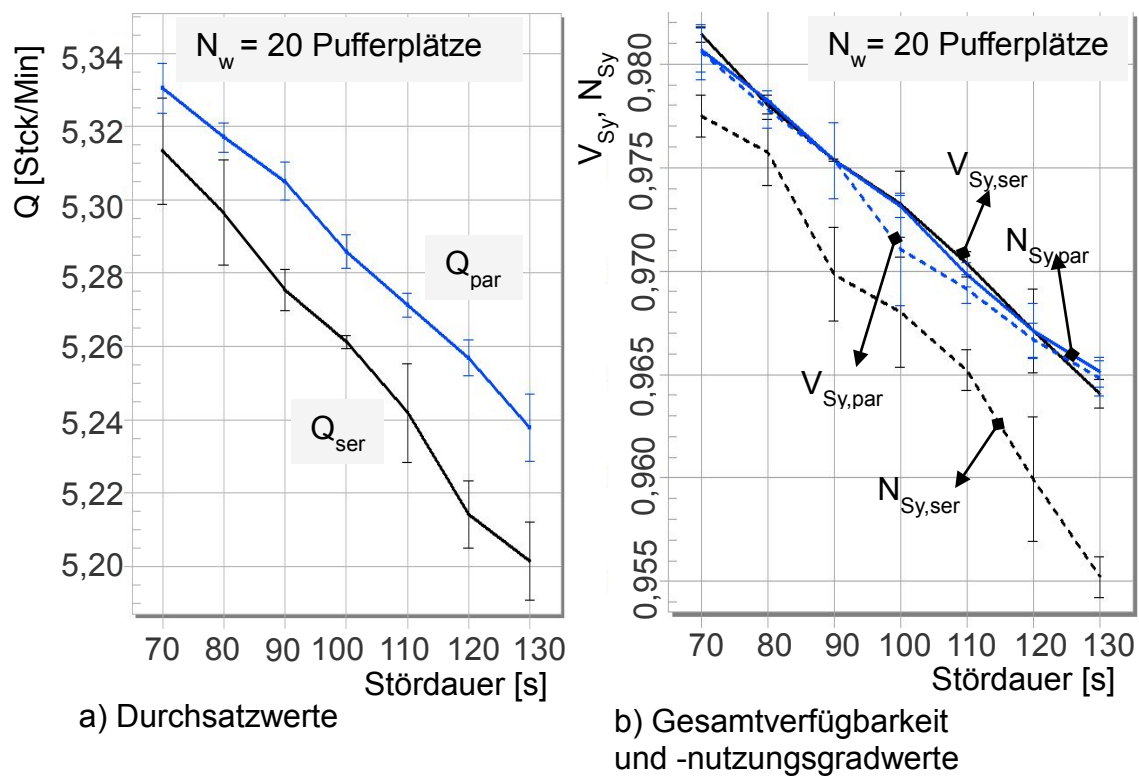


Abb. 6.29: Einfluss von Stördauern auf die Kurven des Durchsatzes, des Gesamtnutzungsgrades und der Gesamtverfügbarkeit im Fall einer gleichen Laufdauer (Fließlinien ohne Engpässe, $N_w = 20$ Pufferplätze)

Allerdings weist die parallele Struktur die bessere Fähigkeit auf, Störungswirkungen zu bewältigen. Diese Aussage ist umso eindeutiger, je größer die Stördauer ist. Betrachtet man die Annahmen dieser Untersuchungsreihe, so lassen sich hierbei die Vorteile der parallelen Struktur grundsätzlich so begründen, dass die Anzahl der Stationen in der Linie den Haupteinfluss auf die Gesamtsumme der Verkettungsverluste und dadurch auf den Nutzungsgrad bzw. Durchsatz der Fließlinie ausübt.

Die Wirkung der Puffer wird für eine Struktur mit 20 Pufferplätzen nachstehend in Abb. 6.30 gezeigt, wobei eine Wahrscheinlichkeit der Häufigkeiten von Pufferinhalten dargestellt wird.

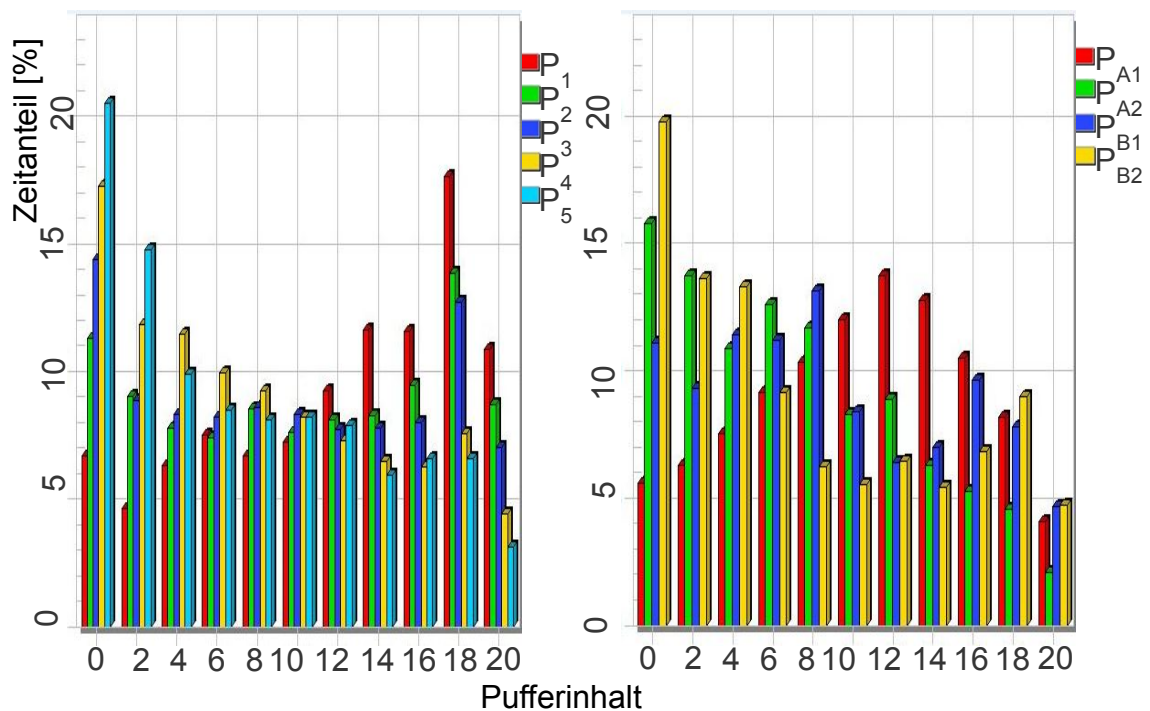


Abb. 6.30: Wahrscheinlichkeiten der Häufigkeiten von Pufferinhalten (Fließlinien ohne Engpässe)

Es ist ersichtlich, dass die Puffer wegen der Bearbeitungszeitschwankungen und der Entstehung von Störungen temporär gefüllt und entleert werden. Das Befüllungs- und Entleerungsverhalten ist grundsätzlich abhängig von der angenommenen mittleren Stördauer (in diesem Fall 90 s) und den Bearbeitungszeiten der Stationen (11 bzw. 22 s):

- In den beiden Strukturen sind die im Anfang der Linie befindlichen Puffer häufiger voll belegt und die am Ende der Linie befindlichen Puffer häufiger leer, denn Blockierzeitanteile treten auf den ersten Stationen und Wartezeitanteile auf den letzten Stationen in der Linie auf.

- Bei serieller Struktur sind die Puffer häufiger gefüllt und entleert, da die Bearbeitungszeiten geringer als bei paralleler Struktur sind, aber die mittlere Störungsdauer gleich ist. Diese Aussage erklärt, warum die Wirkung der Puffer bei der seriellen Struktur stärker als bei der parallelen Struktur ist (vgl. z.B. Abb. 6.25, Abb. 6.27, Abb. 6.29).

6.4.2.2 Manuelle Arbeit

In den vorherigen Untersuchungsreihen werden Untersuchungsfälle betrachtet, in denen Bearbeitungszeitschwankungen beim Variantenwechsel auftreten. In der Praxis treten weiterhin Schwankungen von Bearbeitungszeiten bei manueller Arbeit auf, die traditionell durch Puffer bewältigt werden. Um den Einfluss der Pufferkapazitäten auf den Durchsatz in solchen Fließsystemen zu analysieren, werden die beiden Strukturen mit Vernachlässigung von Engpässen untersucht, d.h. die zu untersuchenden Bearbeitungszeitwerte sind mit (11/3/7/15 ZE⁶⁹) bei der seriellen Struktur und (22/4,24/17/27 ZE) bei der parallelen Struktur vorgegeben. Außerdem treten auf den Stationen keine Störungen auf. Also besitzen die Stationen jeweils eine Verfügbarkeit⁷⁰ von 100 %.

Das Ziel dieser Untersuchungsreihe ist nicht nur, einen Vergleich zwischen den Durchsätzen der beiden Strukturen durchzuführen, sondern auch den Puffereinfluss auf den Durchsatz im Fall einer reinen Handarbeit zu beschreiben. Die Zusammenwirkung zwischen der Erhöhung von Pufferkapazitäten und Durchsätzen zeigt Abb. 6.31 auf.

Sind die Stationen starr verkettet, so ergeben sich diese Durchsätze: $Q_{\text{ser}} = 0,077 \text{ Stck/ZE}$, $Q_{\text{par}} = 0,083 \text{ Stck/ZE}$. Vorteilhafterweise ist der Q_{par} um 7,7 % höher als Q_{ser} . Das Ergebnis bestätigt ebenso den großen Einfluss der Linienlänge auf die Vermehrung der Verkettungsverluste bei manuellen Fließlinien. Eine Erhöhung der Durchsätze um etwa 6-8 % erfolgt mit den Pufferkapazitäten von einem Platz. Sind die Stationen jeweils durch 5 Pufferplätze entkoppelt, so ergeben sich hierbei gleiche Durchsätze in den beiden Strukturen, die sich bei der Vergrößerung der Pufferkapazitäten kaum verbessern.

⁶⁹ Taktzeiten bei manuellen Fließlinien sind grundsätzlich größer als bei automatisierten Fließlinien. Die Dimension der ZE wird daher offen gelassen.

⁷⁰ In der Praxis dürfte aber die Gesamtverfügbarkeit komplexer Anlagen den Wert 98 % nicht überschreiten, vgl. (VDI636, 1987).

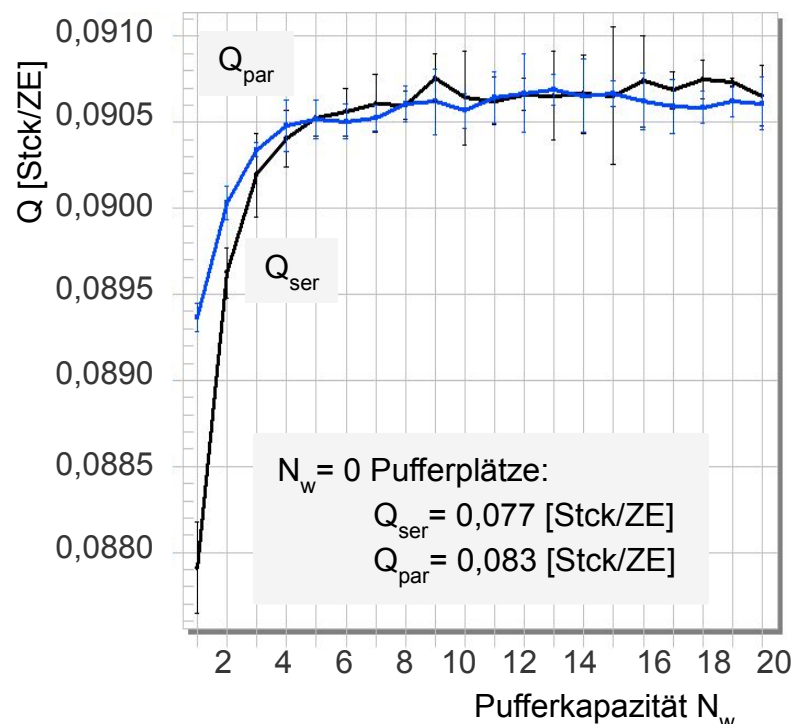


Abb. 6.31: Einfluss von Pufferkapazitäten auf den Durchsatz bei manuellen Fließlinien

6.4.3 Zusammenfassung und Auswertung der Ergebnisse

Im Rahmen dieses Kapitels wurden die Eigenschaften, Systemkenngrößen und das Systemverhalten von zwei gleichartigen parallelen Fließlinien im Vergleich zur im Beispiel B dargestellten seriellen Struktur untersucht. Um einen angemessenen Vergleich zwischen serieller und paralleler Struktur durchzuführen, wurde ausgehend von einem gleichen Vorranggraphen, der bestimmten Taktzeit und unter Berücksichtigung gleicher Rahmenbedingungen wie bei der seriellen Struktur die parallele Struktur erstellt. In der Praxis wird man von deutlich größeren Arbeitsmengen und höherer Anzahl von Arbeitsgängen ausgehen. Weiterhin kann die Variantenanzahl deutlich höher sein (im Extrem bei der Montage von PKW bis zu mehreren Tausend).

Die im Abs. 6.4.1 durchgeführten Untersuchungen haben die Wirkungen von unregelmäßigen Auftragsschwankungen auf die Systemkenngrößen bzw. die Linienleistungen aufgezeigt. Dank der Annahme der exponentiellen Zwischenankunftszeiten von Aufträgen können im Allgemeinen die gewonnenen Aussagen für unterschiedliche Auftragsschwankungen genutzt werden. Die Ergebnisse der Untersuchungen haben die hohe Flexibilität der parallelen Struktur im Vergleich zur seriellen Struktur nachgewiesen, wenn Überkapazitäten und Unterkapazitäten auf-

treten. Bei Unterkapazitäten kann auf der Grundlage des höheren möglichen Durchsatzes eine höhere Ausbringungsmenge erreicht werden, während bei Überkapazitäten nicht alle Kapazitäten genutzt werden müssen.

Im Zuge der im Abs. 6.4.2 durchgeführten Untersuchungen wurden die unterschiedlichen Wirkungen von internen Einflussgrößen analysiert, wobei vor allem der Spezialisierungsgrad von Varianten und auch der Automatisierungsgrad der Arbeitsgänge berücksichtigt wurden. Selbst wenn die Annahme geringerer Stationsverfügbarkeiten bei der parallelen Struktur zutrifft, weist sie grundsätzlich im Vergleich zur seriellen Struktur einen höheren Gesamtnutzungsgrad bzw. Durchsatz auf. Des Weiteren wirken sich die Puffer bei der parallelen Struktur deutlich effektiver aus.

Bewertung der Strukturen

Ausgehend von den im Abs. 2.6.5 dargestellten Bewertungskriterien und unter Beachtung der untersuchten Kenngrößen und der gewonnenen Ergebnisse soll eine grobe Bewertung der dargestellten seriellen und parallelen Strukturen qualitativ erfolgen. Der Fokus liegt dadurch auf den in Abb. 2.11 dargestellten Kriterien, welche in der vorliegenden Arbeit näher untersucht wurden.

Monetär quantifizierbare Kriterien

Dabei werden alle wichtigsten Kostenarten berücksichtigt. Im Vordergrund stehen die einmaligen Investitionskosten. Sie umfassen grundsätzlich alle anfallenden Kosten für die Betriebs- und Fördermittel, Puffereinrichtungen sowie Flächen. In der parallelen Struktur wurden die Arbeitsgänge verdoppelt, wobei die Betriebsmittelkosten (im Extrem bis zum Doppelten⁷¹) erhöht werden können. Jedoch sind diese Kosten eng mit dem Automatisierungsgrad der Arbeitsgänge verbunden. Somit ist ihr Anteil an den Gesamtkosten bei automatisierten Stationen hoch und bei manueller Arbeit geringer. Die zweckmäßige Pufferanzahl und vor allem die Pufferplätze zwischen den Stationen sind jedoch bei der seriellen Struktur deutlich größer. Bei der Erhöhung der Anzahl der parallelen Linien um eins reduziert sich i.d.R.⁷² die Pufferanzahl im gleichen Maße um eins. Der Flächenbedarf der Puffer und deren Kapitalbindungskosten wirken sich deshalb bei der parallelen Struktur geringer aus. Diesem Vorteil kann eine geringfügige Erhöhung der benötigten Sta-

⁷¹ Ausnahmen dafür stellen hier das dargestellte Beispiel im Modell von Zäpfel (Abs. 2.6.3.2) und die Konfiguration von ungleichartigen parallelen Linien nach der Strategie 2 (Abs. 6.2) dar.

⁷² Im Modell von Zäpfel (Abs. 2.6.3.2) reduziert sich aber die Pufferanzahl nicht im gleichen Verhältnis wie bei der Erhöhung der Anzahl der parallelen Linien.

tionsflächen gegenüberstehen, die aus der Verdopplung der Arbeitsgänge resultiert. Zusätzlicher Aufwand kann sich aus gleichem Grund bei der parallelen Struktur bei der Durchführung von Instandhaltungsmaßnahmen ergeben.

Die höheren einmaligen Investitionsaufwendungen bei der parallelen Struktur können eventuell⁷³ durch den höheren Erlös kompensiert werden, falls der gegenüber der seriellen Struktur höhere Durchsatz (Produktionsgeschwindigkeit) genutzt werden kann. Außerdem lassen sich die Termintreue erhöhen und damit eventuelle Verspätungskosten reduzieren. In der Betriebsphase sind hauptsächlich die Lohn-, Energie-, Steuerungs-, Instandhaltungs-, Schulungs- und Qualifizierungskosten zu beachten. Unter der Annahme, dass die Anzahl der Mitarbeiter pro Station in den beiden Strukturen konstant ist, ergeben sich daraus bei insgesamt gleicher Stationsanzahl gleiche Lohnkosten. Bei Unterlast können durch Stilllegung einer Linie bei der parallelen Struktur Lohnkosten eher als bei der seriellen Struktur reduziert werden. Energiekosten umfassen hauptsächlich die Kosten der Elektroenergie. Einerseits treten bei der parallelen Struktur wegen des hohen Nutzungsgrades bzw. Durchsatzes geringere Energiekosten pro Erzeugnis auf; andererseits verbrauchen die Maschinen bei den automatisierten⁷⁴ parallelen Linien mehr Energie. Allerdings ist die Energieersparnis bei Unterkapazitäten erheblich höher. In Hinsicht auf die Schulung bzw. Qualifizierung der Mitarbeiter können bei der parallelen Struktur geringere Kosten auftreten, da sich die Stationsanzahl pro Linie halbiert und die parallelen Stationen identisch sind. Umgekehrt ist es eindeutig, dass die Steuerung der parallelen Struktur schwieriger als die der seriellen Struktur ist, weshalb zusätzliche Kosten auftreten.

Monetär nicht quantifizierbare Kriterien

Die zunehmende Flexibilität bei der parallelen Struktur hat positive Wirkungen bezüglich der internen und externen Einflussgrößen. Stückzahlveränderungen können bei der parallelen Struktur besser bewältigt werden. Bezüglich der Variantenvielfalt ist bei der parallelen Struktur wegen der höheren Taktzeit die Wahrscheinlichkeit höher, Taktzeitüberschreitungen bzw. Arbeitsüberlastungen zu vermeiden und dadurch auf die Benutzung von Springern zu verzichten. Aus diesem Grund sind dabei die Störungswirkungen geringer als bei der seriellen Struktur, wobei sich Störungen mit geringen Stördauern innerhalb der Taktzeit leicht beheben

⁷³ Vor allem bei Marktfertigung.

⁷⁴ Bei manueller Arbeit bedeutet die Verdopplung der Arbeitsgänge nicht unbedingt die Verdopplung der Maschinen, die Energie verbrauchen, sondern vielmehr die Verdopplung der Bearbeitungszeiten.

lassen. Ferner haben die Untersuchungen in diesem Kapitel aufgezeigt, dass bei der parallelen Struktur wegen der kleinen Stationsanzahl pro Linie die Verkettungsverluste erheblich geringer sind.

Die Vergrößerung der Arbeitsinhalte von Stationen wirkt sich ebenso positiv auf Arbeitsbedingungen und Produktqualität aus. Die Möglichkeiten zum Belastungswechsel innerhalb der Station oder zwischen zwei parallelen Stationen sind Gründe zur Reduzierung von körperlichen und psychischen Belastungen. Ebenso vermindert sich die Monotonie. Die Produktqualität kann bei der parallelen Struktur höher sein, denn der Wiederholungsgrad ist geringer.

Die Bewertungsergebnisse lassen sich in Tab. 6.2 zusammenfassen, wobei die positiven Wirkungen durch das Symbol (+) und die negativen Wirkungen durch (-) bezeichnet werden. Ist die Bewertung unter gewissen Umständen positiv und in anderen Fällen negativ, so wird sie durch (+/-) bezeichnet.

Tab. 6.2: Bewertung von ausgewählten Kriterien bei der parallelen Struktur im Vergleich zur seriellen Struktur

Monetär quantifizierbare Kriterien	Bewertung	Monetär nicht quantifizierbare Kriterien	Bewertung
Betriebsmittel	(-)	Stückzahlveränderung	(+)
Durchlaufzeit, Durchsatz bzw. Erlös	(+)	Variantenvielfalt	(+)
Puffer	(+)	Störungswirkungen	(+)
Flächenbedarf	(+/-)	Belastungswechsel	(+)
Energie	(+/-)	Springer	(+)
Schulung bzw. Qualifikation	(+)	Flexibilität	(+)
Steuerung	(-)		
Instandhaltungskosten	(-)		
Qualitätskosten	(+)		

Es ist eindeutig, dass sich aus der Parallelisierung von Fließlinien wesentliche Vorteile ergeben. Nachteile bestehen hauptsächlich wegen höherer einmaliger Betriebsmittelkosten und Steuerungs- sowie auch Instandhaltungskosten, die durch die Ersparnis von laufenden Betriebskosten kompensiert werden können. Bezüglich der Verbesserung der Flexibilität und der logistischen Kenngrößen, vor allem kurze Durchlaufzeit und dadurch Termintreue, weist die parallele Struktur positive Wirkungen auf.

7 Optimierung von Pufferkapazitäten: Kombination von parallel gleichartigen Fließlinien

Der Fokus dieses Kapitels liegt auf der weiteren Verbesserung der elastischen parallelen Struktur, wobei eine Methode mit dem Ziel entwickelt wird, die Pufferkosten zu reduzieren und die logistischen Kenngrößen weiter zu verbessern. Die Vorteile dieser Vorgehensweise werden durch entsprechende analytische Überlegungen und Simulationsexperimente nachgewiesen.

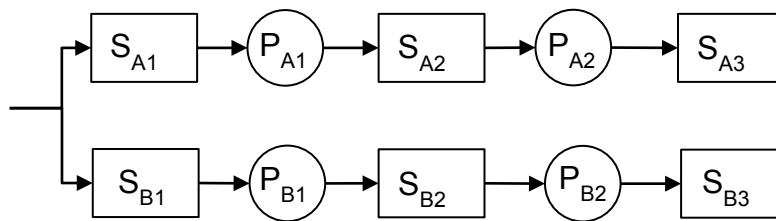
7.1 Entwicklung der Methode

Unter Betrachtung mehrerer gleichartiger Fließlinien (parallele Struktur) zur Herstellung gleicher Gruppen von Varianten besteht eine Möglichkeit darin, die Flexibilität der parallelen elastischen Struktur zu erhöhen, indem die Stationsverfügbarkeiten und -nutzungsgrade weiter erhöht und vor allem die Pufferkosten erheblich reduziert werden können. Dafür werden jeweils zwei parallele Fließlinien miteinander durch Puffer verbunden, vgl. (Al Khateeb, 2010; Al Khateeb, 2011). Um das neue Modell zu erstellen, werden jeweils zwei nebeneinander liegende Stationen der beiden Linien (symmetrische Anordnung) mit einem einzelnen gemeinsamen Abgangspuffer verbunden. Das bedeutet, jeweils zwei parallele Puffer sind miteinander zusammenzufassen⁷⁵, vgl. Abb. 7.1.

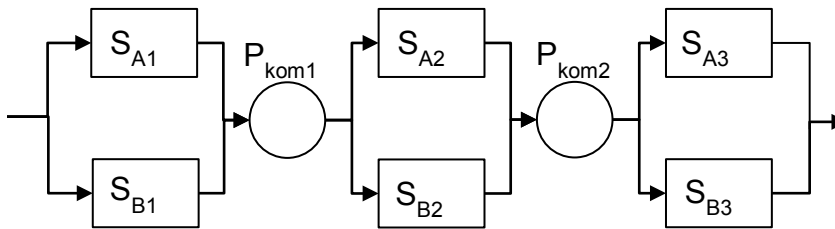
Auf diese Weise lassen sich die alten und neuen Strukturen als konventionelle bzw. kombinierte Strukturen bezeichnen. Es ist dabei ersichtlich, dass bspw. die Puffer P_{A1} und P_{B1} zum Puffer $P_{\text{kom}1}$ (gemeinsamer Puffer) zusammengefasst werden. Im Allgemeinen werden die nachstehend aufgeführten Annahmen getroffen, um das neue Modell zu erstellen:

- Die beiden Fließlinien sind identisch, so dass sie dieselben Einrichtungen und Nutzungsbedingungen haben. Weiterhin können sie das gleiche Spektrum von Varianten bearbeiten.
- Die beiden Fließlinien befinden sich räumlich nebeneinander, um den Kombinationsaufwand von parallelen Puffern zu reduzieren.

⁷⁵ Sind die parallelen Puffer Durchlaufpuffer, so lässt sich vorstellen, dass die Linien durch Rücklaufpuffer verbunden werden.



a) parallele elastische Struktur (konventionelle Struktur)



b) kombinierte Struktur

Abb. 7.1: Die neue kombinierte Struktur

Um die Erhöhung der Flexibilität bei der kombinierten Struktur im Vergleich zur konventionellen Struktur (Abb. 7.1.a) näher zu verdeutlichen, werden die Beziehungen zwischen den Zuständen der Stationen und den mit ihnen verbundenen Puffern bei den konventionellen und kombinierten Strukturen betrachtet. Ausgehend vom Pufferzustand (z.B. P_{A1} : leer, teilweise belegt oder voll belegt) lassen sich die Zustände der Stationen S_{A1} und S_{A2} (blockiert, wartend, oder arbeitend⁷⁶) grundsätzlich antizipieren. Diese Zusammenhänge bei den konventionellen und kombinierten Strukturen werden in Tab. 7.1 und Tab. 7.2 dargestellt.

Tab. 7.1: Wirkungen der Pufferbefüllung auf die damit verbundenen Stationen bei der konventionellen Struktur

Linie A \ Linie B	P_{A1} : leer S_{A1} : wartend oder arbeitend	P_{A1} : teilweise belegt	P_{A1} : voll belegt S_{A2} : arbeitend
P_{B1} : leer S_{B1} : wartend oder arbeitend	S_{A2} : wartend S_{B2} : wartend	S_{A1}, S_{A2} : arbeitend S_{B2} : wartend	S_{A1} : blockiert S_{B2} : wartend
P_{B1} : teilweise belegt	S_{A2} : wartend S_{B1}, S_{B2} : arbeitend	S_{A1}, S_{A2} : arbeitend S_{B1}, S_{B2} : arbeitend	S_{A1} : blockiert S_{B1}, S_{B2} : arbeitend
P_{B1} : voll belegt S_{B2} : arbeitend	S_{A2} : wartend S_{B1} : blockiert	S_{A1}, S_{A2} : arbeitend S_{B1} : blockiert	S_{A1} : blockiert S_{B1} : blockiert

⁷⁶ Exemplarische Darstellung, es wird hier auf den Zustand „gestört“ verzichtet.

Tab. 7.2: Wirkungen der Pufferbefüllung auf die damit verbundenen Stationen bei der kombinierten Struktur

Puffer-zustand	P_{kom1} : leer, S_{A1} , S_{B1} : wartend oder arbeitend	P_{kom1} : teilweise belegt	P_{kom1} : voll belegt S_{A2} , S_{B2} : arbeitend
Stations-zustand	S_{A2} : wartend S_{B2} : wartend	S_{A1} , S_{A2} : arbeitend S_{B1} , S_{B2} : arbeitend	S_{A1} : blockiert S_{B1} : blockiert

Bei den Stationszuständen (wartend und blockiert) treten Verkettungsverluste auf, die hier grau markiert werden. Bei der konventionellen Struktur kann es so in einem bestimmten Zeitraum passieren, dass eine der parallelen Stationen auf ein Erzeugnis wartet, während die andere parallele Station arbeitet oder blockiert ist. Bemerkbar ist aber, dass bei der kombinierten Struktur die parallelen Stationen immer einen der drei gleichen Zustände haben, welche die markierte Diagonale der Tab. 7.1 darstellen, d.h., es wird auf die anderen sechs Fälle verzichtet. Daher können die parallelen Stationen bei der kombinierten Struktur als teilweise redundant gelten, so dass sich dadurch die Warte- und Blockierzeitanteile reduzieren.

Wird der Stationszustand „gestört“ berücksichtigt, so ergibt sich Redundanz, wenn drei Bedingungen gleichzeitig erfüllt sind, vgl. Tab. 7.2:

- Mindestens eine der zwei parallelen Stationen (Nachfolger) ist „hungrig“.
- Der andere parallele Nachfolger ist gestört oder blockiert.
- Der Zugangspuffer P_{kom1} ist mindestens mit einem Erzeugnis belegt.

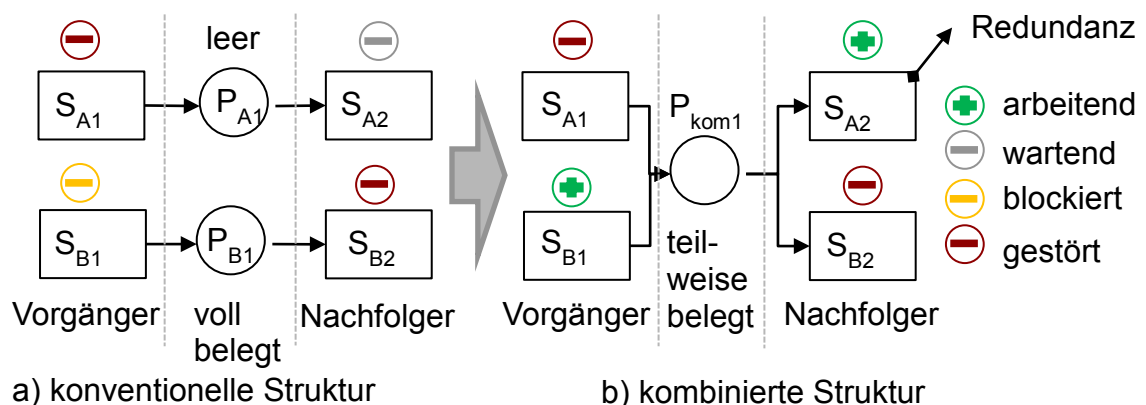


Abb. 7.2: Beispiel zur Darstellung der Redundanz bei der kombinierten Struktur

Eine Frage ist dabei noch nicht beantwortet: wie groß die Kapazitäten von gemeinsamen Puffern sein sollten. Um diese Frage zu beantworten, ist zwischen zwei Fällen zu unterscheiden. Im ersten Fall werden manuelle Fließlinien mit Be-

arbeitszeitschwankungen untersucht, während im zweiten Fall das Störverhalten bei automatisierten und hybriden Fließlinien beachtet wird.

7.2 Pufferkapazitäten bei kombinierten manuellen Fließlinien

Zur Modellierung reiner Handarbeitsplätze mit schwankenden Bearbeitungszeiten lassen sich die analytischen Modelle (G/G/1- bzw. G/G/m-Modelle) aufgrund kurzer Rechenzeit und der Genauigkeit ihrer Aussagen anwenden, vgl. Abs. 4.2.1.1. Für die Beschreibung der generellen Verteilung müssen dabei lediglich die Mittelwerte und Variationskoeffizienten der Bearbeitungsstationen bekannt sein. In diesem Zusammenhang können deshalb beliebige Bearbeitungszeitverteilungen durch die generelle Verteilung dargestellt werden. Ausgehend von der Flexibilität dieser Modelle können dabei unterschiedliche oder gleiche mittlere Bearbeitungszeiten der Stationen (zulässige Lösungen oder perfekt abgestimmte Bearbeitungszeiten) analysiert werden, vgl. (Kuhn & Tempelmeier, 1997).

Wie im Abs. 4.2.1.1 erläutert, muss das Fließsystem in fiktive Subsysteme zerlegt werden, die sich jeweils aus zwei nacheinander folgenden Stationen und dem dazwischen liegenden Puffer zusammensetzen. Also kann man jede Fließlinie, die in Abb. 7.1.a. dargestellt wird, in zwei fiktive Subsysteme unterteilen, während sich die entsprechende kombinierte Struktur (Abb. 7.1.b) in zwei Subsysteme zerlegen lässt. Zur Vereinfachung wird angenommen, dass die Subsysteme in jedem Fließsystem gleich sind, sodass die resultierenden Aussagen für beide Subsysteme geeignet sind. Die zu modellierenden Subsysteme stellt Abb. 7.3 dar.

Jedes Subsystem bei der konventionellen Struktur (Abb. 7.3.a) lässt sich durch das G/G/1-Modell darstellen. Die Zwischenankunftszeit der Erzeugnisse gleicht der mittleren Bearbeitungszeit (Erwartungswert) $E(t_{a,A1})$ der ersten Station des Subsystems in der Fließlinie A. Auf diese Weise sind die Bedienrate μ_{A1} dieser Station und die Ankunftsrate λ_A des Wartesystems gleich. Dadurch lässt sich ausdrücken, dass sich der Ankunftsprozess aus der ersten Station des Subsystems ergibt. Für die Darstellung des Bedienprozesses gilt die mittlere Bedienzeit (Bearbeitungszeit) $E(t_{b,A2})$ und die Bedienrate μ_{A2} der zweiten Station des Subsystems. Unter Berücksichtigung der Annahme, dass die Fließlinien A und B gleichartig sind, gilt das Folgende: $\lambda_A = \lambda_B$, $\mu_{A2} = \mu_{B2} = \mu$.

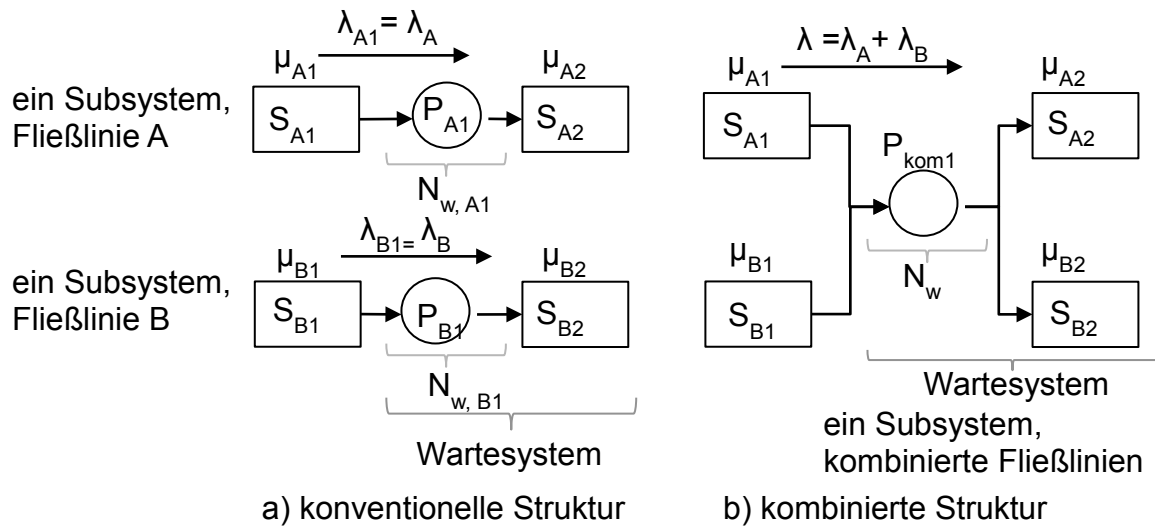


Abb. 7.3: Beispiel für zwei Subsysteme serieller Struktur und das entsprechende Subsystem bei paralleler Struktur

Mithilfe der Formel (4.16) berechnen sich die Auslastungsgrade der beiden Subsysteme der Linien A und B (ρ_A bzw. ρ_B), die ebenso gleich sind:

$$\rho_A = \rho_B = \frac{\lambda_A}{\mu_{A2}} = \frac{\lambda_B}{\mu_{B2}} \quad (7.1)$$

In der kombinierten Struktur geht man hierbei davon aus, dass die beiden Erzeugnisströme, die aus den parallelen Stationen S_{A1} und S_{B1} kommen, in einen gemeinsamen Strom mit der Summe der Ankunftsrate λ_{A1} und λ_{B1} am Eingang des Puffers P_{Kom1} zusammengefasst werden. Es ist dabei zu beachten, dass die ankommenden Erzeugnisse in den separaten gleichen Stationen S_{A1} und S_{B1} bearbeitet wurden; d.h., diese Stationen sind nicht kombiniert und deshalb entsteht keine Faltung der Zwischenankunftszeiten. Da die Ankunftszeiten der Erzeugnisse bei den beiden Strömen generell verteilt sind, ergibt sich ebenso eine generell verteilte Ankunftszeit für den gesamten Strom. Dementsprechend kann man dann annehmen, dass die Werte der Standardabweichung bzw. Variationskoeffizienten VK_a der Ankunftszeiten bei der konventionellen und kombinierten Struktur gleich sind. Demzufolge lassen sich die Variationskoeffizienten für die Ankunfts- und Bedienzeiten in den beiden Strukturen mithilfe der Formeln (4.17) und (4.18) berechnen:

$$VK_a = \frac{\sqrt{\text{Var}(t_{a,A1})}}{E(t_{a,A1})} \text{ oder } VK_a = \frac{\sqrt{\text{Var}(t_{a,B1})}}{E(t_{a,B1})} \quad (7.2)$$

$$VK_b = \frac{\sqrt{\text{Var}(t_{b,A2})}}{E(t_{b,A2})} \text{ oder } VK_b = \frac{\sqrt{\text{Var}(t_{b,B2})}}{E(t_{b,B2})} \quad (7.3)$$

Für den Auslastungsgrad bei der kombinierten Struktur ρ_{kom} gilt:

$$\rho_{\text{kom}} = \frac{\lambda_{A1} + \lambda_{B1}}{\mu_{A2} + \mu_{B2}} = \frac{\lambda}{2\mu} \quad (7.4)$$

$$\rho_{\text{kom}} = \rho_A = \rho_B = \rho \quad (7.5)$$

Da in der kombinierten Struktur die Anzahl der parallelen Stationen nach dem Puffer P_{Kom1} größer als eins (zwei Bedienstationen S_{A2} und S_{B2}) ist, lässt sich das Subsystem (Abb. 7.3.b) durch das G/G/m-Modell beschreiben und analysieren. Ausgehend von den oben dargestellten Überlegungen und Annahmen kennzeichnet sich die Anzahl der parallelen Stationen ($m=2$) als der einzige Unterschied zwischen den konventionellen und kombinierten Strukturen.

Sind die Pufferkapazitäten groß genug (d.h. sie werden nie voll belegt), der Warteprozess stationär (eingeschwungener Zustand), und die Anzahl der Erzeugnisse (K) im Wartesystem ($k \geq m$), so lassen sich die Beziehungen zwischen den mittleren Warteschlangenlängen⁷⁷ der Puffer ($N_{w,A1} = N_{w,B1}$ und N_w) bei der parallelen Linien A, B bzw. kombinierten Fließlinien darstellen. Mit Unterstützung der Approximationen von Allen-Cunneen (A-C), Krämer-Langenbach-Belz, Kulbatzki und des Little's-Gesetzes (vgl. Formeln (4.19)-(4.27)) wird abhängig von der Anzahl der parallelen Stationen m (Anzahl paralleler Linien) und den Quadratwerten der Variationskoeffizienten (VK_a^2 , VK_b^2) die Warteschlangenlänge N_w ermittelt und dargestellt. In den Fällen von $m=1, 5, 10$ und bei den Auslastungsgraden von $\rho=70, 90$ und 95% ergibt sich nach (Bolch, Greiner, de Meer, & Trivedi, 2006) ein Dreidimensionales Diagramm, das in Abb. 7.4. dargestellt wird.

Es ist vor allem zu bemerken, dass im Fall $m=1$ der Puffer P_{Kom1} den Puffer P_{A1} oder P_{B1} darstellt, während im Fall $m > 1$ (kombinierte Struktur) anstatt zwei nur

⁷⁷ Bei der Dimensionierung von Puffern mithilfe der Warteschlangenmodelle spielt die mittlere Warteschlangenlänge eine große Rolle, vgl. Abs. 4.2.1.1.

eine Pufferanlage P_{Kom1} vorgesehen wird. An dieser Stelle lässt sich sagen, dass die in einer von den parallelen Linien vorhandenen Puffer als gemeinsame Puffer verwendet werden können.

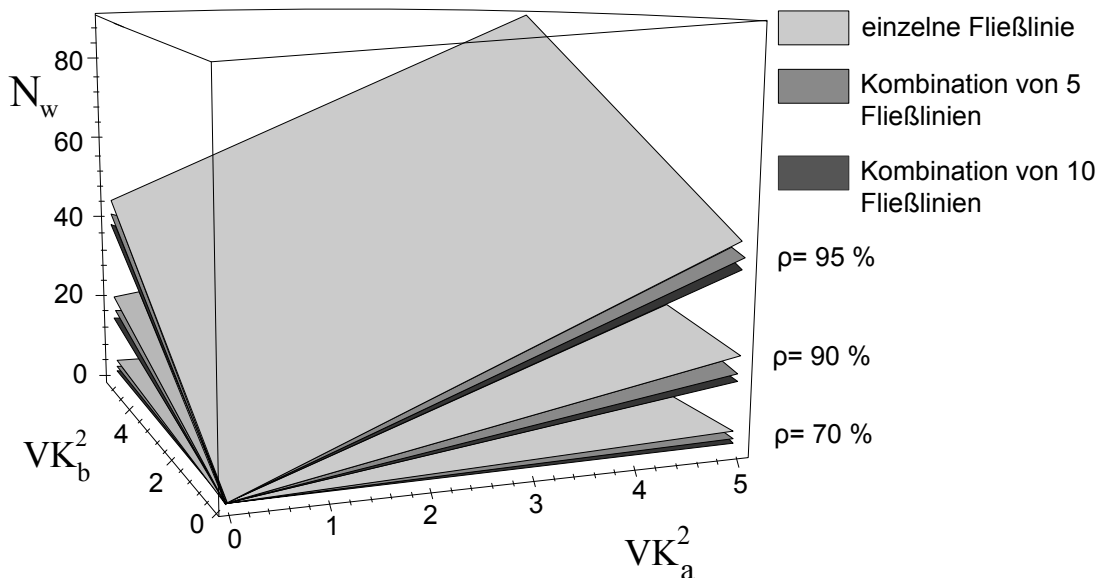


Abb. 7.4: Mittelwert der Warteschlangenlänge N_w für das G/G/m-Modell (mit $\rho = 70, 90, 95\%$ und $m = 1, 5, 10$) in Anlehnung an (Bolch, Greiner, de Meer, & Trivedi, 2006, S. 273)

Zunächst lässt sich nach der Betrachtung der Abb. 7.4 festhalten, dass die benötigten Pufferkapazitäten nach der Kombination um mehr als die Hälfte reduziert werden können. Mit der Erhöhung der Anzahl kombinierter Fließlinien und bei Haltung des Auslastungsgrades ρ (z.B. $\rho = 90\%$) reduziert sich weiterhin die Pufferkapazität N_w , d.h. die Ersparnis der Pufferkapazitäten ist höher. Ersichtlich ist des Weiteren, dass die Pufferkapazitäten umso größer zu dimensionieren sind, je größer die Abweichungen (Variationskoeffizienten) der Ankunfts- und/oder Bedienzeiten sind und noch mehr, je höher der Auslastungsgrad ist.

Wie oben angenommen wird, resultiert aus der Kombination die gleiche Ersparnis der Pufferkapazitäten im zweiten Subsystem. Die Reduzierung der Anzahl von Puffern in der kombinierten Struktur auf die Hälfte (Abb. 7.1.b) wird weiterhin von einer Minimierung ihrer Pufferkapazitäten begleitet, um den zuvor erreichten Durchsatz beizubehalten. Um das Ergebnis zu erklären, wird das Verhalten der Pufferbefüllung und -entleerung analysiert. Solange die Verteilungen der Bearbeitungszeiten der parallelen Bearbeitungsstationen nicht konstant sind (in diesem Beispiel generelle Verteilung), treten die von den Stationen ankommenden Erzeugnisse meist nicht gleichzeitig in den gemeinsamen Puffer ein, und analog verlassen sie ihn nicht gleichzeitig. Die Bewegungen der Erzeugnisse aus und in

den gemeinsamen Puffer hängen von den Pufferkapazitäten und von der Verteilung der Bearbeitungszeiten der mit demselben Puffer verbundenen Stationen ab.

7.3 Simulationsuntersuchungen von kombinierten hybriden und automatisierten Fließlinien

7.3.1 Simulationsmodell

Mit Unterstützung der Simulation wird im Folgenden ein Vergleich des Systemverhaltens zwischen seriellen, parallelen (konventionellen) und kombinierten Strukturen durchgeführt (vgl. Abb. 7.5), wobei vor allem das Zusammenwirken zwischen den Pufferkapazitäten, der Gesamtverfügbarkeit ($V_{Sy,ser}$, $V_{Sy,par}$, $V_{Sy,kom}$), dem Gesamtnutzungsgrad ($N_{Sy,ser}$, $N_{Sy,par}$, $N_{Sy,kom}$) und dem Durchsatz (Q_{ser} , Q_{par} , Q_{kom}) analysiert wird.

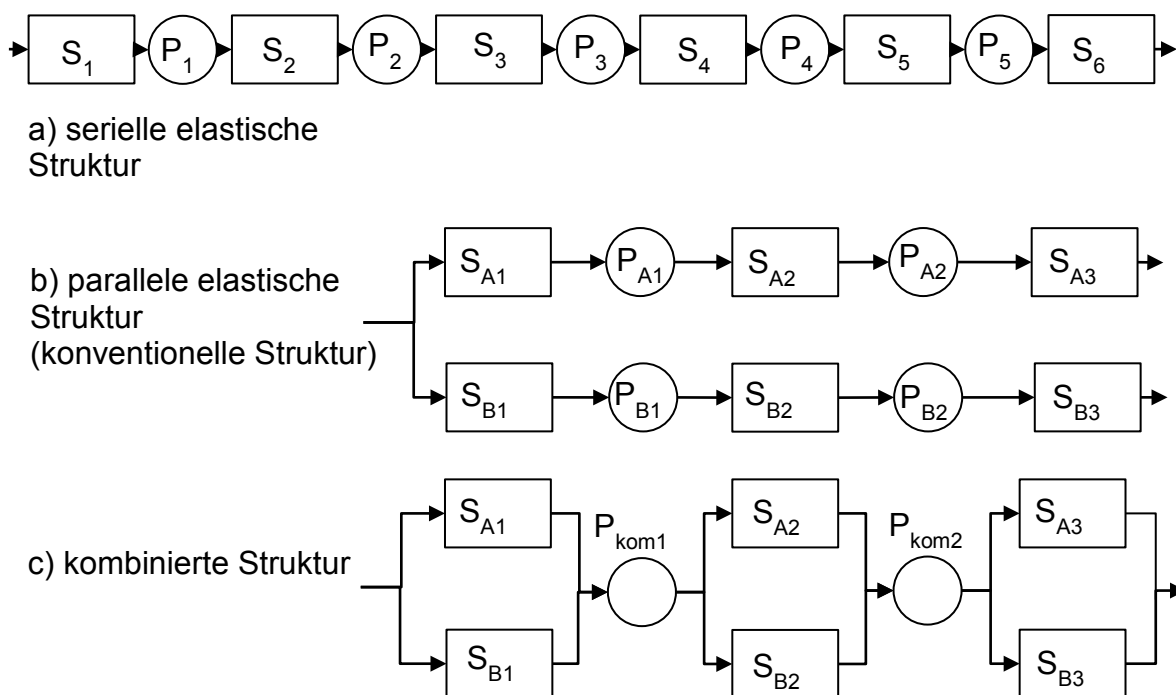


Abb. 7.5: Die zu untersuchenden elastischen Strukturen

Man geht davon aus, dass die Pufferkapazitäten bei den drei Strukturen beschränkt sind. Weiterhin sind die Modelle, die im Abs.⁷⁸ 6.4.2.1 dargestellt werden, weiter zu untersuchen. Also sind die normalverteilten Bearbeitungszeiten der Stationen bei der seriellen Struktur (11/3/7/15 s) und bei der konventionellen bzw.

⁷⁸ Vgl. Untertitel „Gleiche Stördauer aber unterschiedliche Laufdauer (zweites Szenario)“.

kombinierten Struktur (22/4,24/17/27 s) vorgegeben. Da die kombinierte Struktur der Fließlinien eine signifikante Reduzierung der geplanten Pufferkapazitäten um mehr als die Hälfte ermöglicht, wird in den Strukturen der Abb. 7.5 von gleichen Pufferkapazitäten je Puffer ausgegangen.

7.3.2 Simulationsergebnisse

Haben die Stationen in den drei Strukturen jeweils eine einzelne Verfügbarkeit von 80 %, so stellt Abb. 7.6 den Puffereinfluss auf die Systemkenngrößen dar.

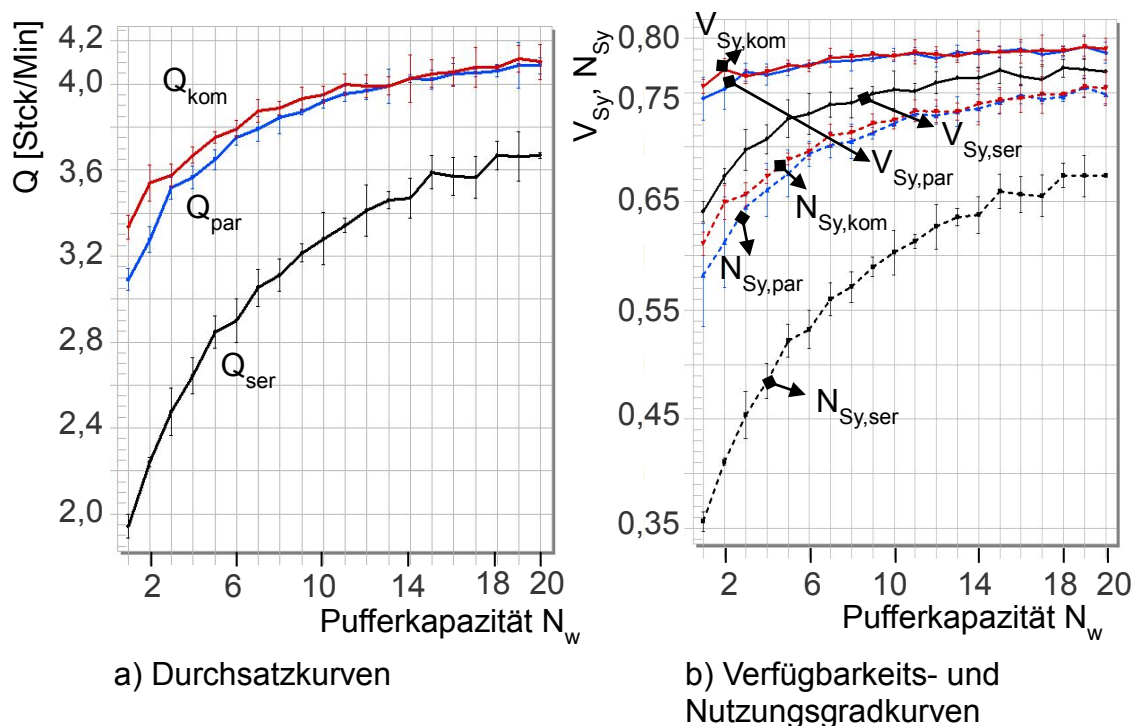


Abb. 7.6: Vergleich des Puffereinflusses auf die Systemkenngrößen und den Durchsatz bei einer einzelnen Stationsverfügbarkeit von 80 %

Wegen der Verkettung reduzieren sich die durchschnittlichen Verfügbarkeitswerte bis auf etwa $V_{Sy,ser} = 64 \%$, $V_{Sy,par} = 74 \%$, $V_{Sy,kom} = 76 \%$ bei einer Pufferkapazität von einem Pufferplatz. Diese signifikante Reduzierung der Verfügbarkeitswerte insbesondere bei der seriellen Struktur haben die vorherigen Untersuchungen nicht aufgewiesen, da immer von höheren einzelnen Stationsverfügbarkeiten (etwa 95%) ausgegangen wurde. Bei Pufferkapazitäten $N_w \geq 3$ Pufferplätzen treffen sich die Verfügbarkeitskurven bei den kombinierten und konventionellen Strukturen und sie laufen weiter parallel. Allerdings erhöhen sich die Verfügbar-

keitswerte $V_{Sy,ser}$ mit der Erhöhung der Pufferkapazitäten, aber sie bleiben immer⁷⁹ kleiner als die $V_{Sy,par}$ und $V_{Sy,kom}$.

Einen eindeutigen Unterschied zwischen den drei Strukturen weisen die Nutzungsgrad- und Durchsatzkurven auf. Bei $N_w = 1$ Pufferplatz ergeben sich die folgenden Gesamtnutzungsgrade und Durchsätze: $N_{Sy,ser} = 36 \%$, $N_{Sy,par} = 58 \%$, $N_{Sy,kom} = 61 \%$, $Q_{ser} = 1,95$ Stck/Min, $Q_{par} = 3,1$ Stck/Min, $Q_{kom} = 3,35$ Stck/Min. Der daraus resultierende Durchsatz ist bei paralleler Struktur sehr viel höher als bei der seriellen Struktur (etwa 59 %), während bei der kombinierten Struktur eine weitere Erhöhung des Durchsatzes bis auf etwa 71,8 % stattfindet. Bei der Erhöhung der Pufferkapazitäten erhöhen sich die Durchsätze und gleichzeitig reduzieren sich die Unterschiede zwischen ihnen. Also treffen sich die Durchsatzkurven Q_{par} und Q_{kom} bei Pufferkapazitäten von 13 Pufferplätzen und verlaufen bei weiterer Erhöhung fast parallel. Der Unterschied zum Durchsatzwert Q_{ser} bleibt mit der Erhöhung der Pufferkapazitäten bis auf 20 Pufferplätze immer noch groß ($Q_{ser} = 3,37$, $Q_{par} = \lambda_{kom} = 4,1$ Stck/Min).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass in der kombinierten Struktur je zwei parallele Stationen von einem Zugangspuffer mit Erzeugnissen versorgt werden und dass sie die bearbeiteten Erzeugnisse an einen Abgangspuffer liefern, wodurch keine direkten Verbindungen zwischen den Stationen entstehen (vgl. Abb. 7.5.c). Wenn eine Störung an einer Station auftritt, wird ihre Wirkung auf die Fließlinie relativ gering sein, weil die Nachfolgestationen von dem gemeinsamen Zugangspuffer versorgt werden und gleichzeitig die Vorgängerstationen die Werkstücke in den entsprechenden gemeinsamen Abgangspuffern abgeben.

Die Stationen funktionieren in der kombinierten Struktur teilweise als redundant. Diese Funktion wächst mit der Reduzierung der Stationsverfügbarkeit und der Pufferkapazitäten. Da die Erhöhung der Pufferkapazitäten und der Stationsfunktion als Redundanz zur Reduzierung von Verkettungsverlusten führen, kann es bei elastischer Verkettung geschehen, dass sich bei den parallelen und kombinierten Strukturen über eine bestimmte Pufferkapazität ($N_w = 13$ Pufferplätze in Abb. 7.6) die gleichen Durchsätze ergeben. Das bedeutet, die Reduzierung der Pufferkapazitäten um die Hälfte bei der kombinierten Struktur und die dadurch mögliche denkbare Verschlechterung des Durchsatzes wird durch die Redundanzfunktion kompensiert.

⁷⁹ Theoretisch sollten sich gleiche Werte von $V_{Sy,ser}$, $V_{Sy,par}$ und $V_{Sy,kom}$ bei loser Verkettung ergeben.

Um die Einflüsse der einzelnen Stationsverfügbarkeiten auf die Kenngrößen des Gesamtsystems weiter zu verdeutlichen, werden darüber hinaus zwei Untersuchungen mit unterschiedlichen Verfügbarkeitswerten (70, 75, 80, 85, 90 bzw. 95 %) in Fällen der starren und elastischen (z.B. $N_w = 5$ Pufferplätze) Verkettung durchgeführt. Die Ergebnisse zeigt Abb. 7.7.

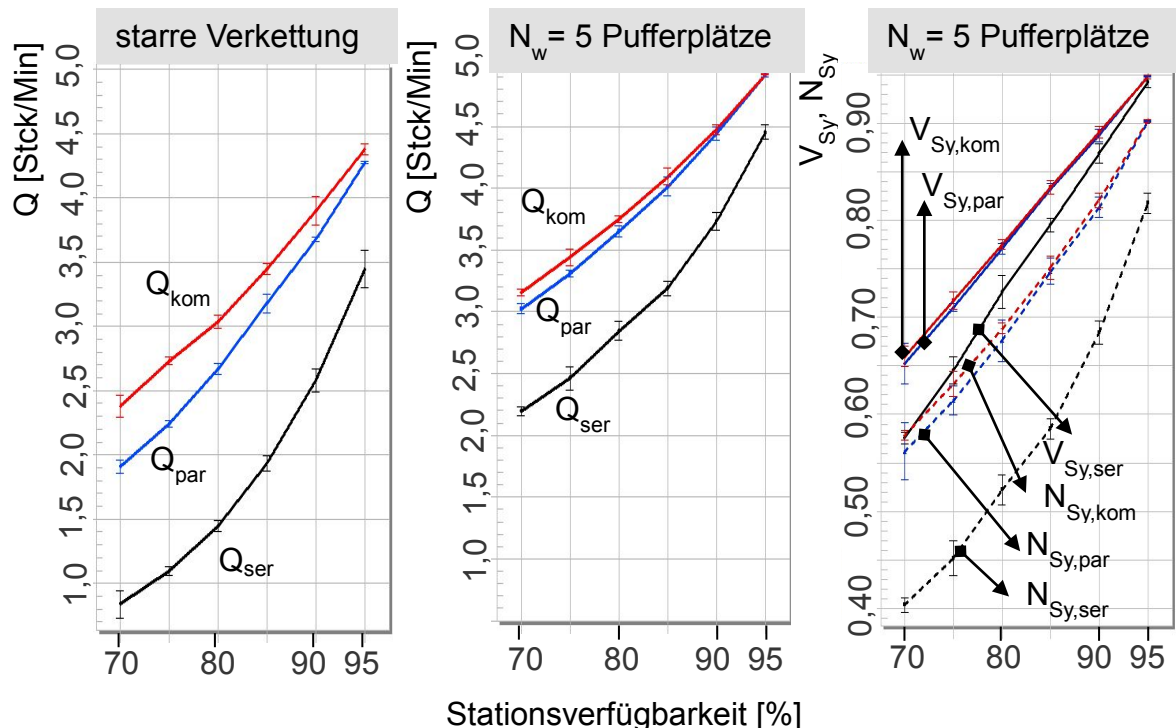


Abb. 7.7: Vergleich des Einflusses verschiedener einzelner Stationsverfügbarkeiten auf die Systemkenngrößen und den Durchsatz

Im Gegensatz zu Untersuchungen, die in früheren Abschnitten durchgeführt wurden, verursachen die geringen einzelnen Stationsverfügbarkeiten erhebliche Verkettungsverluste, die vor allem von der Verkettungsart und den Linienlängen abhängig sind. Ihre Auswirkungen auf alle Systemkenngrößen sind umso deutlicher, je geringer die einzelnen Stationsverfügbarkeiten sind. Im Vergleich zur starren seriellen Struktur erfolgen bei der Verfügbarkeit einzelner Stationen von 70 % in den starren parallelen und kombinierten Strukturen Durchsatzerhöhungen um etwa 125 % bzw. 180 %. Die Erhöhungen bei der elastischen Verkettung ($N_w = 5$) betragen 36,3 % bzw. 43,18 %.

Im Vergleich zur seriellen Struktur sind parallele und noch mehr kombinierte Strukturen von erheblichem Vorteil, d.h., in Hinsicht auf die Systemverfügbarkeit, den -nutzungsgrad und Durchsatz und je geringer die Stationsverfügbarkeiten und Pufferkapazitäten sind.

7.3.3 Weitere Vorteile der kombinierten Struktur

Zusätzlich zu der erheblichen Ersparnis an Pufferkapazitäten weist die kombinierte Struktur die folgenden Vorteile auf:

- Verkleinerung des Flächenbedarfs: Die neue Struktur führt dazu, dass die Flächen der als nicht weiter erforderlich angesehenen Puffer und damit die zuvor zwischen der Fließlinie liegenden Flächen dieser Puffer gewonnen werden. Je größer die Bearbeitungszeitschwankungen sind, desto größer sind die Pufferkapazitäten auszulegen. Diese Zunahme der Pufferkapazitäten ist erforderlich zur Erhöhung der Nutzungsgrade von Stationen durch Verminderung der Blockierzeiten und Wartezeiten der Gesamtprozesse und führt schließlich zur Erhöhung des Durchsatzes.
- Weitere Potenziale bei Fließbandabstimmung: Falls die Bearbeitungszeit einer Station (z.B. S_{A2} und S_{B2}) größer als die Bearbeitungszeit der vorgelagerten und nachgelagerten Stationen ist, aber kleiner als das Doppelte, sodass die Addition einer parallel gleichen Station in jeder parallelen Fließlinie, um den Durchsatz zu erhöhen, nicht wirtschaftlich ist, existiert in der neuen Struktur die Möglichkeit, eine parallele Station S_{zu} zu beiden symmetrischen Stationen hinzuzufügen, vgl. Abb. 7.8.

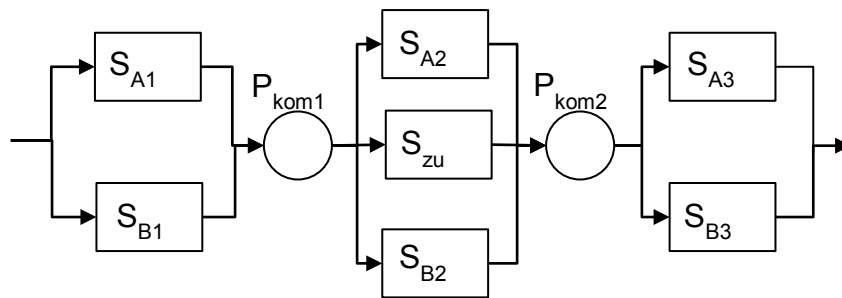


Abb. 7.8: Darstellung einer Möglichkeit, eine weitere Station parallel zu beiden parallelen Stationen hinzuzufügen

7.4 Zusammenfassung und Auswertung der Ergebnisse

Die Herausforderung bei der Kombination von gleichartigen parallelen Fließlinien besteht in der Realisierung von kombinierten Puffern. Wird die Kombination durch Rücklaufpuffer realisiert, so besteht ein Vorteil darin, dass die eventuelle Entstehung von Störungen in den Puffereinrichtungen nur beschränkte oder keine Wirkungen auf die verbundenen Linien hat. Nachteiligerweise wird die Kombination von mehr als zwei Linien schwieriger, so dass Sperrflächen zwischen den Linien

entstehen können. Weiterhin nehmen die Anforderungen an die Steuerung grundsätzlich zu.

Trotz einer erheblichen Einsparung an Pufferkapazitäten bei der kombinierten Struktur hat sich die Pufferfunktion verbessert. Das führt zu einer verbesserten Ausnutzung der Pufferkapazitäten. Durch die dargestellte Kombination von Fließlinien erhöht sich die Synergie zwischen den parallelen Linien erheblich, wobei nicht nur die gleichen Mitarbeiter⁸⁰ in beiden jeweils parallelen Stationen beschäftigt sein können, sondern auch die Erzeugnisse lassen sich jeweils zu einer dieser parallelen Stationen weitergeben. Das hat zur Folge, dass Redundanz bzw. Flexibilität erheblich erhöht werden können. Somit erfolgen eine starke Reduzierung der Verkettungsverluste und eine große Erhöhung des Gesamtnutzungsgrads bzw. Durchsatzes. Die in diesem Kapitel und auch in Kapitel 6 gewonnenen Resultate lassen sich zusammenfassend in Abb. 7.9 darstellen.

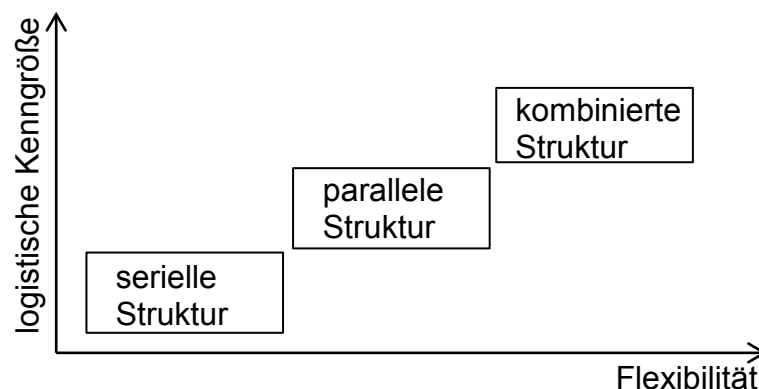


Abb. 7.9: Grober Vergleich zwischen den seriellen, parallelen und kombinierten Strukturen

Sowohl die durch die analytische Methode nachgewiesene Ersparnis an Pufferkapazitäten und den damit in Verbindung stehenden Pufferkosten als auch die durch die Simulation ermittelte Verbesserung der logistischen Kenngrößen bei der kombinierten Struktur sollten zur Erhöhung der Flexibilität und zugleich der Wirtschaftlichkeit der parallelen Struktur im Vergleich zur seriellen Struktur beitragen.

Kommen auch die Ergebnisse, die insbesondere in Kapitel 5 bzw. 6 dargestellt wurden, in Betracht, so erkennt man, dass eine erhebliche Verbesserung der logistischen Kenngrößen in Fließmontagesystemen nur durch entsprechende Planungsmaßnahmen in der Konfigurationsphase erreichbar ist. Das bedeutet, die in Abb. 1.4 dargestellte Verschiebung des Zielsystems wird durch eine Prozessorien-

⁸⁰ Diese Alternative wird in dieser Arbeit nicht simuliert und untersucht.

tierung in Form von Strukturanpassung bzw. -entwicklung erreicht. Diese Aussage wird in Abb. 7.10 dargestellt, wobei ein Pfeil zum Ausdrücken der Verschiebung von Planungsmaßnahmen von der Betriebsphase in Richtung Konfigurationsphase gezeichnet wird.

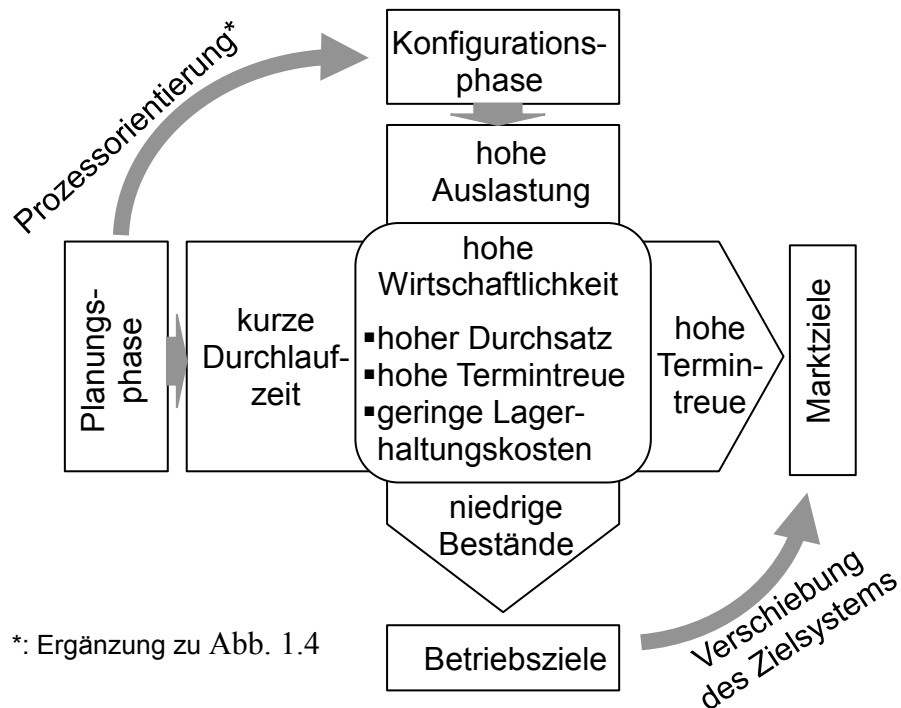


Abb. 7.10: Einfluss des Wandels des Zielsystems auf die Prozessorientierung bei Fließmontagesystemen

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die zunehmenden Anforderungen an Fließmontagesysteme - traditionell für die Serien- und Massenfertigung, heute zunehmend für die Kleinserie, die Variantenfließfertigung bis hin zur Losgröße 1 - insbesondere die Anpassungsfähigkeit für das Erreichen von Marktzielen, haben Auswirkungen auf Struktur und Gestaltung von Fließsystemen. Sie müssen auf unerwartete Verhaltensänderungen von Kunden und Wettbewerbern kurzfristig reagieren. Die bisherigen Studien und Untersuchungen haben allerdings aufgezeigt, dass Defizite bei der Bewältigung von Belastungsschwankungen, seien es Unterkapazitäten oder Überkapazitäten, bestehen. Trotz hoher Investitionskosten sind die Lösungsansätze zur Verbesserung der Nutzungsgrade von Fließsystemen nicht ausreichend. Aus diesem Grund war es zunächst von großer Bedeutung, das gesamte Fließmontagesystem zu beachten, die Probleme und Ursachen zu verdeutlichen und vorhandene Verbesserungsmethoden bzw. Lösungsansätze darzustellen.

Ausgangspunkt dieser Arbeit war die Festlegung eines Zielkatalogs, in dem wesentliche logistische Zielsetzungen definiert werden: Erhöhung der Termintreue (Reduzierung der Durchlaufzeit), Erhöhung des Nutzungsgrades bzw. Durchsatzes und Reduzierung der Puffergrößen bzw. der Kapitalbindung. Unter Beachtung der Strukturalternativen und auch der Absatzart bzw. der Nachfrageschwankungen wurden die Eigenschaften und das Systemverhalten von Fließmontagesystemen beschrieben. Weiterhin wurden die wesentlichen Einflussgrößen auf die definierten Zielsetzungen ermittelt, wobei sie in externe und interne Einflussgrößen eingeteilt wurden. Um die wichtigsten Planungsaufgaben und Verbesserungsmethoden zu erfassen, wurde zwischen der Konfigurations- und Betriebsphase unterschieden. Das Ziel war dabei, die Planungsprobleme herauszuarbeiten und die vorhandenen Lösungsansätze kritisch zu behandeln. Anschließend konnten die untersuchungsorientierten Schwerpunkte dieser Arbeit definiert und umfassend dargestellt werden, vgl. Abs. 4.4. Sie wurden in die Entwicklung konvergierender bzw. divergierender und paralleler Strukturen untergliedert.

Im Rahmen der konvergierenden und divergierenden Strukturen lag der Fokus auf der Entwicklung von Nachbearbeitungsschleifen, da noch keine Lösungsansätze zur Konfiguration der Nachbearbeitungslinie (Nebenlinie) oder zur Entlastung des Engpasses in der Hauptlinie vorhanden sind. Demzufolge entstehen Leistungsverluste in der Haupt- und Nebenlinie, vgl. Abs. 5.1.1. Die Lösung konzentrierte

sich auf die Aufteilung des Systems in Segmente und die Ermittlung der optimalen Taktzeiten in jedem Segment ausgehend von der Taktzeit des Output-Segments oder den optimalen Taktzeiten anderer Segmente. Für diesen Zweck wurde eine neue Methode analytisch entwickelt, in der Taktzeiten bei Schleifen unabhängig von der Jahresstückzahl berechnet werden können. Die gewonnen Aussagen bei der Durchführung dieser Methode wurden anhand des Beispiels C verdeutlicht, vgl. Abs. 5.1.2.2. In einem weiteren Schritt wurden sie so erweitert, dass sie zur Definition von Engpässen bzw. zur Verminderung ihrer Wirkungen in einfachen Fällen benutzt werden können, vgl. Abs. 5.2.

Neben der dargestellten Anwendung dieser Methode lässt sie sich bei der Konfiguration von ungleichartigen parallelen Fließlinien einsetzen. Dabei lassen sich unter Berücksichtigung der Jahresstückzahl einzelner Varianten anstatt gleicher Taktzeiten für die parallelen Linien unterschiedliche Taktzeiten und deshalb unterschiedliche Produktionsgeschwindigkeiten planen. Es wurde angestrebt, entsprechende Lösungen zur Bewältigung von internen Einflussgrößen (große Bearbeitungszeitschwankungen) oder zur Erhöhung der Termintreue und Minderung negativer Wirkungen von Nachfrageschwankungen zu finden. Jedoch konnte diese Art der Parallelisierung nicht ausreichend analysiert werden, da die Ergebnisse stark von den Randbedingungen des untersuchten Beispiels beeinflussbar waren. Daher lag der Fokus auf der Untersuchung der Struktur von gleichartigen parallelen Fließlinien (parallele Struktur) im Vergleich zur seriellen Struktur, vgl. Abs. 6.3 und 6.4. Eindeutig war hierbei die erhebliche Verbesserung des Gesamtnutzungsgrades bzw. Durchsatzes bei der parallelen Struktur. Die Durchlaufzeit wurde kürzer, die Termintreue dadurch höher. Den Vorteil bei Unterkapazitäten ergänzend, zeigen sich positive Auswirkungen auch bei Überkapazitäten, indem bspw. nur eine Linie zur Fertigung von kleinen Mengen benutzt werden soll. Das bedeutet einerseits mehr Flexibilität und Motivation für die Mitarbeiter und andererseits eine weitere Ersparnis von betrieblichen Kosten. Die am Ende des Kapitels 6 durchgeführte Bewertung gilt nur als ein grober Vergleich zwischen den seriellen und parallelen Strukturen, da mögliche Unterschiede, Vorteile oder Nachteile nicht in vollem Umfang berücksichtigt werden, sondern aus beispielhaften Untersuchungen Schlüsse gezogen werden.

Ausgehend von den hohen Investitionskosten bei der parallelen Struktur und unter Berücksichtigung ihrer Vorteile, insbesondere ihrer Flexibilität im Vergleich zur seriellen Struktur, wurde in Kapitel 7 eine neue Methode zur weiteren Verbesserung der parallelen Struktur entwickelt. Die angestrebten Verbesserungsmöglich-

keiten umfassen vor allem die Reduzierung von Pufferanlagen bzw. -kosten und gleichzeitig die Verbesserung der Ausnutzung ihrer Kapazitäten. Das erfolgt durch die Kombination von gleichartigen parallelen Fließlinien durch Puffer, d.h., die parallelen Stationen werden durch einen gemeinsamen Puffer verbunden. Die Realisierung dieser Kombination ist jedoch mit zusätzlichen Kosten bezüglich der Verwirklichung von Ausschleusungs- und Zusammenführungselementen sowie für die Steuerung des Materialflusses verbunden. Da in dieser Arbeit nicht von einer bestimmten Fertigungsanlage, Puffereinrichtung oder Produktvarianten ausgegangen wurde, konnte die Umsetzung zu einem kombinierten Puffer bezüglich ihrer technischen Realisierung nicht behandelt werden. Die Ergebnisse bzw. Vorteile der Kombination bei manuellen Fließlinien wurden analytisch und danach anhand eines Beispiels für die Fälle der hybriden bzw. automatisierten Fließlinien mithilfe der Simulation nachgewiesen. Die kombinierte Struktur weist eine hohe Flexibilität im Vergleich zur konventionellen parallelen Struktur und zur seriellen Struktur auf. Trotz der erheblichen Reduzierung der Pufferkapazitäten wurden die logistischen Kenngrößen verbessert.

Bei der Entwicklung der dargestellten neuen Methoden wurde die analytische Methode benutzt. Zur Erweiterung bzw. Veranschaulichung der gewonnenen Aussagen wurde unter Berücksichtigung von praxisnahen Randbedingungen das Modell im Beispiel B weiterentwickelt, simuliert und untersucht. Während der Entwicklung dieses Modells wurden grundsätzlich die Verfahren der Fließbandabstimmung betrachtet, vgl. Beispiel C und Abs. 6.3.2. Weiterhin wurde der Automatisierungsgrad von Arbeitsgängen durch die Annahmen bzw. die Untersuchung von deterministischen oder normalverteilten Bearbeitungszeiten sowie die Untersuchungen von Bearbeitungszeitschwankungen und/oder Stördauern berücksichtigt. Die Verwendung der Simulation war darüber hinaus zur Untersuchung des Einflusses von Störungen und Pufferkapazitäten auf das Betriebsverhalten erforderlich.

Die in der vorliegenden Arbeit entwickelten Methoden bzw. vorgeschlagenen Lösungsansätze sollen zur Verbesserung der Konfiguration bzw. des Betriebs von Fließmontagesystemen, vor allem für die Variantenfließfertigung, beitragen. Sie stellen erste Schritte zur Lösung von bestimmten Planungsaufgaben insbesondere in der Konfigurationsphase (Neuplanung) dar. Eine praxisgerechte Umstellung von der klassischen seriellen zu einer parallelen Struktur oder die Kombination von vorhandenen parallelen Fließlinien kann sehr aufwändig sein, erscheint aber sehr wohl lohnend im Hinblick auf die sich verändernden Zielsetzungen.

Literaturverzeichnis

- Adam, D. (1997). *Produktions-Management*. Wiesbaden: Gabler-Verlag.
- Ahmadi, R. H., & Wurgaft, H. (1994). Design for synchronized flow manufacturing. *Management Science*, Vol. 40, No.11, S. 1469-1483.
- Ahmadi, R. H., Dasu, S., & Tang, C. S. (1992). The dynamic line allocation problem. *Management Science* Vol. 38, No. 9, S. 1341–1353.
- Al Khateeb, A. (März 2010). *Kombinierte Fertigungslinien als neue Strategie in flexiblen Fertigungssystemen. zugl.: Combined manufacturing lines feature a new strategy in flexible manufacturing systems*. Abgerufen am 18. Juni 2013 von Logistics journal : LJ / Wissenschaftliche Gesellschaft für Technische Logistik e.V. ISSN: 1860-7977: http://www.logistics-journal.de/archiv/2010/2401/Al_Khateeb.pdf
- Al Khateeb, A. (2010). Optimierung von Fließproduktionssystemen mit Nachbearbeitungsschleifen. 6. *Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik (WGTL)* (S. 277-288). Hannover/Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum.
- Al Khateeb, A. (2011). Investigation of economic alternatives for the configuration of flow production systems. *56th IWK, International Scientific Colloquium* (S. 91). Ilmenau University of Technology: Ilmedia.
- Altrogge, G. (1979). Flexibilität in der Produktion. In W. Kern, H.-H. Schröder, & J. Weber, *Handwörterbuch der Produktionswirtschaft* (S. 604-618). Stuttgart.
- Arnold, D., & Furmans, K. (2005). *Materialfluss in Logistiksystemen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Arnold, D., Isermann, H., Kuhn, A., Horst, T., & Furmans, K. (2008). *Handbuch Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Balakrishnan, A., & Vanderbeck, F. (1999). A tactical planning model for mixed-model electronics assembly operations. *Operations Research* Vol. 47, No. 3, S. 395– 409.
- Balakrishnan, J., Cheng, C.-H., Ho, K.-C., & Yang, K. K. (2009). The application of single-pass heuristics for U-lines. *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 28, No. 1, S. 28-40.
- Bamberg, G., Baur, F., & Krapp, M. (2012). *Statistik*. München: Oldenbourg-Verlag.

- Basu, R. N. (1977). The interstage buffer storage capacity of non-powered assembly lines - A simple mathematical approach. *International Journal of Production Research*, Vol. 15, No. 4, S. 365-382.
- Baybars, I. (1986). A survey of exact algorithms for the simple assembly line balancing problem. *Management Science*, Vol. 32, No. 8, S. 909-932.
- Becker, C., & Scholl, A. (2006). A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, Vol. 168, No. 3, S. 694-715.
- Becker, T. (2005). *Prozesse in Produktion und Supply Chain optimieren*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Beins, G. (1997). *Konzeption eines modularen Steuerungssystems für Puffer : untersucht am Beispiel der Automobilfertigung*. zugl.: Dissertation, Universität Bremen, 1996 u.d.T.: Einsatz und Steuerung von Puffern in der Automobilfertigung. Aachen: Mainz-Verlag.
- Benzer, R., Gökçen, H., Çetinyokuş, T., & Çerçioğlu, H. (2007). A network model for parallel line balancing problem. *Mathematical problems in engineering : theories, methods and applications*, Vol. 2007, ID 10106, S. 1563-5147.
- Bloech, J., Bogaschewsky, R., Götze, U., & Roland, F. (2004). *Einführung in die Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Blumenfeld, D. E. (1990). A simple formula for estimating throughput of serial production lines with variable Processing times and limited capacity. *International Journal of Production Systems* Vol. 28, No. 6, S. 1163–1182.
- Blumenfeld, D. E., & Li, J. (2005). An analytical formula for throughput of a production line with identical stations and random failures. *Mathematical problems in engineering*, Vol. 2005, No. 3, S. 293–308.
- Bolch, G., Greiner, S., de Meer, H., & Trivedi, K. (2006). *Queueing networks and markov chains: modeling and performance evaluation with computer science applications*. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience-Verlag.
- Boysen, N. (2005). *Variantenfließfertigung*. zugl.: Dissertation, Universität Hamburg, 2005. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag.
- Bullinger, H.-J., Rieth, D., & Euler, H. P. (1993). *Planung entkoppelter Montagesysteme: Puffer in der Montage*. Stuttgart: B. G. Teubner-Verlag.
- Burkhalter, & Philippe, J. (2010). *Steuerungs- und Regelungsstrategien für produktionstechnische Systeme*. zugl.: Dissertation, Eidgen. Techn. Hochsch, 2010. Zürich.

- Buzacott, J. A. (1967). Automatic transfer lines with buffer stocks. *International Journal of Production Research*, Vol. 5, No. 3, S. 183–200.
- Buzacott, J. A., & Shanthikumar, J. G. (1993). *Stochastic models of manufacturing systems*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall-Verlag.
- Buzacott, J. A., Corsten, H., Gössinger, R., & Schneider, H. M. (2010). *Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Konzepte und integrative Entwicklungen*. München: Oldenbourg-Verlag.
- Buzacott, J. A., Liu, X.-G., & Shanthikumar, J. (1995). Multistage flow line analysis with the stopped arrival queue model. *IIE Transactions*, 27, S. 444-455.
- Chakravarty, A. K. (1985). Balancing mixed model lines with in-process inventory. *Management Science*, Vol. 31, No. 9, S. 1161–1174.
- Ciupek, M. (2006). *Beitrag zur simulationsgestützten Planung von Demontagefabriken für Elektro- und Elektronikaltgeräte*. zugl.: Dissertation, Universität Berlin 2006. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verlag.
- Conway, R., Maxwell, W., McClain, J. O., & Thomas, L. J. (1988). The role of work-in-process inventory in serial production lines. *Operations Research*, Vol. 36, No. 2, S. 229-241.
- Corsten, H. (2004). *Produktionswirtschaft: Einführung in das industrielle Produktionsmanagement*. München: Oldenbourg-Verlag.
- Czarnietzki, R. (2008). *Entwicklung rechnerunterstützter Methoden zur Belegungsplanung auf einer Kompaktwerft und deren Anwendung zur Untersuchung ausgewählter Fertigungsreihenfolgen bei der Paneel- und Sektionsfertigung*. zugl.: Dissertation, Universität Rostock, 2008. Rostock.
- Czeranowsky, G. (1974). *Programmplanung bei Auftragsfertigung unter besonderer Berücksichtigung des Terminwesens*. zugl.: Dissertation, Universität Hamburg, 1973. Wiesbaden: Gabler-Verlag.
- Daganzo, C., & Blumenfeld, D. (1994). Assembly system design principles and tradeoffs. *International Journal of Production Research*, Vol. 32, No. 3, S. 669-681.
- Dallery, Y., & Gershwin, S. B. (1992). Manufacturing flow line systems: a review of models and analytical results. *Queueing Systems*, 12, S. 3-94.

- Daub, A. (1994). *Ablaufplanung: Modellbildung, Kapazitätsabstimmung und Unsicherheit*. zugl.: Dissertation, Universität Göttingen, 1994, u.d.T.: Daub, Anke: Möglichkeiten der Berücksichtigung von Kapazitätsabstimmungsmaßnahmen und Unsicherheiten im Rahmen der Ablaufplanung. Köln, Bergisch Gladbach: Josef Eul-Verlag.
- Decker, M. (1993). *Variantenfließfertigung*. Heidelberg: Physica-Verlag.
- DIN199. (2002). *Technische Produktdokumentation: CAD-Modelle, Zeichnungen und Stücklisten, Teil 1: Begriffe*, März. Berlin: Beuth-Verlag.
- DIN31051. (2012). *Grundlagen der Instandhaltung, September*. Berlin: Beuth-Verlag.
- Dochnal, H.-G. (1990). *Darstellung und Analyse von OPT (Optimized Production Technology) als Produktionsplanungs- und -steuerungskonzept*. Köln: Arbeitsbericht 31 // Seminar für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, Industriebetriebslehre und Produktionswirtschaft, Universität zu Köln.
- Domschke, W., & Scholl, A. (1997). *Produktionsplanung: Ablauforganisatorische Aspekte*. Berlin: Springer.
- Domschke, W., & Scholl, A. (2008). *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre: Eine Einführung aus entscheidungsorientierter Sicht*. Berlin: Springer.
- Domschke, W., Klein, R., & Armin, S. (1996). Antizipative Leistungsabstimmung bei moderner Variantenfließfertigung. *Zeitschrift für Betriebswirtschaft : ZfB*, S. 1465-1491.
- Drexl, A., Fleischmann, B., Günther, H.-O., Stadtler, H., & Tempelmeier, H. (1994). Konzeptionelle Grundlagen kapazitätsorientierter PPS-Systeme. *Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung, Band 46, 12*, S. 1022-1045.
- Erel, E., & Sarin, S. C. (1998). A survey of the assembly line balancing procedures. *Production Planning and Control, Vol. 9, No. 5*, S. 414-434.
- Eversheim, W. (1995). *Prozeßorientierte Unternehmensorganisation: Konzepte und Methoden zur Gestaltung "schlanker" Organisationen*. Berlin: Springer.
- Fleischer, J., Stepping, A., & Plaggemeier, J. (2005). Fabrikplanung zur Umsetzung Ganzheitlicher Produktionssysteme im Wertschöpfungsnetz. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb : ZWF, Band 100, 5*, S. 279-282.
- Fremerey, F. (1992). *Erhöhung der Variantenflexibilität in Mehrmodell-Montagesystemen durch ein Verfahren zur Leistungsabstimmung*. zugl.: Dissertation, Universität Stuttgart 1992. Berlin: Springer.

- Furmans, K. (1992). *Ein Beitrag zur theoretischen Behandlung von Materialflusspuffern in Bediensystemnetzwerken*. zugl.: Dissertation, Universität Karlsruhe 1992. Karlsruhe.
- Gökçen, H., Agpak, K., Gencer, C., & Kizilkaya, E. (2005). A shortest route formulation of simple U-type assembly. *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 29, No. 4, S. 373–380.
- Goldratt, E. M., & Cox, J. (1984). *The goal - excellence in manufacturing*. New York: North River Press.
- Großeschallau, W. (1984). *Materialflußrechnung : Modelle und Verfahren zur Analyse und Berechnung von Materialflußsystemen*. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer-Verlag.
- Gudehus, T. (2005). *Logistik : Grundlagen - Strategien - Anwendungen*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag.
- Günther, H.-O., & Tempelmeier, H. (2005). *Produktion und Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Günther, H.-O., & Tempelmeier, H. (2007). *produktion und logistik*. Berlin: Springer.
- Gutenberg, E. (1983). *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre: Die Produktion*. Berlin: Springer-Verlag.
- Hansmann, K.-W. (1984). *Industriebetriebslehre*. München: Oldenbourg-Verlag.
- Helber, S. (1999). *Performance Aanalysis of flow lines with non-linear flow of material*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Helber, S., & Mehrkens, N. (2003). Exact analysis of a continuous material merge system with limited buffer capacity and three stations. *Analysis and modeling of manufacturing systems* (S. 85-121). London: Kluwer academic publishers.
- Hellmich, K. P. (2003). *Kundenorientierte Auftragsabwicklung: Engpassorientierte Planung und Steuerung des Ressourceneinsatzes*. zugl.: Dissertation, Universität Cottbus 2002. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag.
- Hofacker, A. (2010). *Bewertung und Einführung von Lean-Methoden in der Einzel- und Kleinserienfertigung am Beispiel des Stahlbaus*. zugl.: Dissertation, Karlsruher Inst. für Technologie 2010.
- Hoffmann, T. (1963). Assembly line balancing with a precedence matrix. *Management Science*, Vol. 9, No. 4, S. 551-562.

- Hoitsch, H.-J. (1993). *Produktionswirtschaft : Grundlagen einer industriellen Betriebswirtschaftslehre*. München: Franz Vahlen- Verlag.
- Hübner, G. (2002). *Stochastik : Eine anwendungsorientierte Einführung für Informatiker, Ingenieure und Mathematiker*. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg-Verlag.
- Janisch, H.-W. (1979). *Optimierung der Puffer bei elastisch verketteten Fertigungssystemen*. zugl.: Dissertation, Universität Hannover 1979.
- Jusić, H. (2003). *Analyse von nichtlinearen Fließproduktionssystemen*. zugl.: Dissertation, Technische Universität Clausthal, 2003. Lohmar: Eul-Verlag.
- Kaußler, J. (2011). *Methodik zur gestuften Gestaltung von Montagesystemen in der Serienproduktion mit dem Ziel ganzheitlicher Prozesseffizienz*. zugl.: Dissertation, Technische Universität Ilmenau 2011.
- Kern, W. (1992). *Industrielle Produktionswirtschaft*. Stuttgart: Poeschel-Verlag.
- Kießwetter, M. (1999). *Ablaufplanung in der chemischen Industrie: Optimierung mit Evolutionären Algorithmen*. zugl.: Dissertation, Universität Hamburg, 1998 u.d.T.: Chargengrößen- und Ablaufplanung in der chemischen Industrie unter besonderer Berücksichtigung von evolutionären Algorithmen. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag.
- Kistner, K.-P. (2007). Fertigungslinie und serielle Wartesysteme - Möglichkeiten und Grenzen der Modellierung mehrstufiger Fertigungssysteme mit Hilfe der Warteschlangentheorie. *Produktions- und Logistikmanagement*. Hrsg.: Corsten, Hans/Missbauer, Hubert (S. 371-393). München: Vahlen-Verlag.
- Klenke, H. (1977). *Ablaufplanung bei Fließfertigung*. zugl.: Dissertation, Universität Hamburg 1976. Wiesbaden: Gabler-Verlag.
- Kletti, J., & Schumacher, J. (2011). *Die perfekte Produktion: Manufacturing Excellence durch Short Interval Technology (SIT)*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Košturiak, J., & Gregor, M. (1995). *Simulation von Produktionssystemen*. Wien, New York: Springer-Verlag.
- Kratzsch, S. (2000). *Prozess- und Arbeitsorganisation in Fließmontagesystemen*. zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig 2000. Essen: Vulkan-Verlag.
- Kropik, M. (2009). *Produktionsleitsysteme in der Automobilfertigung*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

- Krüger, A. (2004). *Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme*. zugl.: Dissertation, Technische Universität München 2004: Utz-Verlag.
- Krüger, T. (2000). *Nutzungssteigerung verketteter Produktionssysteme*. zugl.: Dissertation, Universität Hannover 1999. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Kuhn, H. (1990). *Einlastungsplanung von flexiblen Fertigungssystemen*. Zugl.: Dissertation, Technische Hochsch. Darmstadt, 1990. Heidelberg: Physica-Verlag.
- Kuhn, H. (1998). *Fließproduktionssysteme: Leistungsbewertung, Konfigurations- und Instandhaltungsplanung*. zugl.: Habil.-Schr., Universität Köln, 1997, u.d.T.: Produktions- und Instandhaltungsplanung von Fließproduktionssystemen. Heidelberg: Physica-Verlag.
- Kuhn, H., & Tempelmeier, H. (1997). Analyse von Fließproduktionssystemen. *Zeitschrift für Betriebswirtschaft, Band 67, 5/6*, S. 561-586.
- Kumpf, A. (2001). *Anforderungsgerechte Modellierung von Materialflusssystemen zur planungsbegleitenden Simulation*. Zugl.: Dissertation, Technische Universität München, 2001. München: Herbert Utz-Verlag.
- Küpper, H.-U., & Helber, S. (2004). *Ablauforganisation in Produktion und Logistik*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel-Verlag.
- Kurbel, K. (2005). *Produktionsplanung und -steuerung im Enterprise Resource Planning und Supply Chain Management*. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH.
- Li, J. (2004). Performance analysis of production systems with rework loops. *IIE Transactions, Vol. 36, No. 8*, S. 755-766.
- Lingnau, V. (1994). *Variantenmanagement : Produktionsplanung im Rahmen einer Produktdifferenzierungsstrategie*. zugl.: Dissertation, Technische Universität Berlin, 1994. Berlin: Schmidt-Verlag.
- Linß, G. (2011). *Qualitätsmanagement für Ingenieure*. München: Hanser-Verlag.
- Lorenz, W. (1984). *Entwicklung eines arbeitsstundenorientierten Warteschlangenmodells zur Prozessabbildung der Werkstattfertigung*. Zugl.: Dissertation, Universität Hannover, Inst. f. Fabrikanlagen, 1984. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Lotter, B., & Wiendahl, H.-P. (2006). *Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis*. Berlin, Heidelberg: springer-Verlag.

- Maier, M. M. (2012). *Praxisgerechte AbnahmeprozEDUREN für intralogistische Systeme unter Berücksichtigung der Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeitstheorie*. zugl.: Dissertation, Technische Universität Ilmenau 2011. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Manitz, M. (2004). *Leistungsanalyse von Montagesystemen mit stochastischen Bearbeitungszeiten*. zugl.: Dissertation, Universität Köln, 2004. Köln: Kölner Wissenschaftsverlag.
- Medo, M. (2010). *Kontinuierliche Planung der Fließfertigung von Varianten*. zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2010. Braunschweig: Shaker-Verlag.
- Metzger, & Helmut. (1977). *Planung und Bewertung von Arbeitssystemen in der Montage*. zugl.: Dissertation, Universität Stuttgart, 1977. Mainz: Krausskopf.
- Miltenburg, J. (1998). Balancing U-lines in a multiple U-line facility. *European Journal of Operational Research*, Vol. 109, No. 1, S. 1-23.
- Monkman, S. K. (2006). *Scheduling of product families on multiple, identical parallel production lines to minimize setup costs*. zugl.: Dissertation, University of Texas at Austin 2006.
- Muth, E. J. (1987). An update on analytical models of serial transfer lines. *Research Report No. 87-15, Department of Industrial and Systems Engineering*.
- Neu, M. (2005). *Unternehmensführung*. Berlin: BWV Berliner Wiss.-Verlag.
- Nyhuis, P., & Wiendahl, H.-P. (1999). *Logistische Kennlinien: Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen*. Berlin: Springer-Verlag.
- Ostertag, M. H. (1996). *Strukturierte Optimierung von Airbag-Auslösesystemen*. zugl.: Dissertation, Technische Hochschule Karlsruhe, 1996. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Özcan, U., Çerçioğlu, H., Gökçen, H., & Toklu, B. (2010). Balancing and sequencing of parallel mixed-model assembly lines. In *International Journal of Production Research*, Vol. 48, 17/18 (S. 5089-5113). London: Taylor & Francis.
- Peschel, E. (1982). Verkettete Fertigungseinrichtungen und ihre Zuverlässigkeit. *VDI-Zeitschrift* 124, 5, S. 157-164.
- Picot, A., Reichwald, R., & Behrbohm, P. (1985). *Menschengerechte Arbeitsplätze sind wirtschaftlich: Vier-Ebenen-Modell der Wirtschaftlichkeitsbeurteilung*. Eschborn: Schriftenreihe RKW Wirtschaftlichkeitsrechnung.

- Pinto, P., Dannenbring, D. G., & Khumawala, B. M. (1975). A branch and bound algorithm for assembly line balancing with paralleling. *International Journal of Production Research*, Vol. 13, No. 2, S. 183-196.
- Pinto, P., Dannenbring, D. G., & Khumawala, B. M. (1981). Branch and bound and heuristic procedures for assembly line balancing with paralleling of stations. *International Journal of Production Research*, Vol. 19, No. 5, S. 565-576.
- REFA. (1978). *Methodenlehre des Arbeitsstudiums, Teil 2: Datenermittlung*. Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V. (Hrsg.). München: Carl Hanser-Verlag.
- Sarker, B. R., & Shanthikumari, J. G. (1983). A generalized approach for serial or parallel line balancing. *International Journal of Production Research*, Vol. 21, No. 1, S. 109-133.
- Scheid, W.-M. (1988). Werkstückträger wird automatisch identifiziert: Materialfluss in der Montage. *Schweizer Maschinenmarkt : SMM*, Band 88, No. 24, S. 52-55.
- Scheid, W.-M. (1990). Materialfluss-Systeme für die Montage. *Europa-Seminar 1990 Neuentwicklungen in der Montageautomation, Handhabungstechnik und automatisierter Lagersysteme : Budapest, 24. - 26. April 1990*. Technische Universität Budapest.
- Scholl, A. (1999). *Balancing and Sequencing of Assembly lines*. zugl.: Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, 1995. Heidelberg: Physica-Verlag.
- Scholl, A., & Becker, C. (2003). State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. *Jenaer Schriften zur Wirtschaftswissenschaft* 22.
- Scholl, P., & Deuse, J. (2009). *Skalierbare Kommissioniersysteme : Entwicklung eines Instrumentariums zur Auswahl eines kostenoptimalen skalierbaren Kommissioniersystems unter Berücksichtigung prognostizierter Auslastungsschwankungen*. Lehrstuhl für Arbeits- und Produktionssysteme. Dortmund.
- Seelbach, H. (1975). *Ablaufplanung*. zugl.: Habil.-Schr., Universität Köln, 1970, u.d.T.: Die Planung mehrstufiger Produktionsprozesse in Mehrproduktunternehmen mit Hilfe von Simulationsverfahren. Würzburg: Physica-Verlag.

- Shingo, S. (1985). *A revolution in manufacturing : the SMED system*. Cambridge, Massachusetts: Productivity Press.
- Spur, G., & Stöferle, T. (1994). *Handbuch der Fertigungstechnik: Fabrikbetrieb*. München: Carl Hanser-Verlag.
- Steffen, R. (1977). *Produktionsplanung bei Fließbandfertigung*. zugl.: Habil.-Schr., Universität Bochum, 1975. Wiebaden: Gabler-Verlag.
- Ten Hompel, M., Schmidt, T., & Nagel, L. (2007). *Materialflusssysteme: Förder- und Lagertechnik*. Berlin: Springer-Verlag.
- Thomopoulos, N. T. (1970). Mixed model line balancing with smoothed station assignments. *Management Science*, Vol. 16, No. 9, S. 593 - 603.
- VDI2815. (1978). *Begriffe für die Produktionsplanung und -steuerung-Eiführung, Grundlagen, Blatt 1*. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- VDI3423. (2011). *Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen: Begriffe, Zeiterfassung und Berechnung*. Berlin: Beuth-Verlag.
- VDI3633. (2000). *Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen, Grundlagen. Blatt 1*. Berlin: Beuth-Verlag.
- VDI636. (1987). Verfügbarkeit von Materialflusssystemen. *VDI-Gesellschaft Materialfluss- und Fördertechnik. Tagung Frankfurt, 4. und 5. Mai 1987* (S. 21-31). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Voigt, K.-I., & Wildemann, H. (2007). Quantifizierung der Flexibilität im Rahmen wertschöpfungspartnerschaftlicher Zusammenarbeit. In *Neue Wege in der Automobillogistik : die Vision der Supra-Adaptivität* (S. 123-136). Berlin: Springer-Verlag.
- Walenda, H. (1991). *Analyse des Betriebsverhaltens elastisch verketteter automatischer Montageanlagen*. zugl.: Dissertation, Universität Hannover, 1991. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Wang, Y. (1995). *Methode für die simulationsunterstützte Optimierung am Beispiel von Montagesystemen*. zugl.: Dissertation, Technische Universität Berlin, 1994. München: Hanser-Verlag.
- Wannenwetsch, H. (2010). *Integrierte Materialwirtschaft und Logistik: Beschaffung, Logistik, Materialwirtschaft und Produktion*. Berlin: Springer-Verlag.

- Warnecke, H. J., & Görke, M. (1978). *Entwicklung von Verfahren zur Taktabstimmung bei gemischter Fließmontage: Arbeitsbericht an die Deutsche Forschungsgemeinschaft über das Forschungsvorhaben*. Stuttgart.
- Weißbach, A. (2012). *Verbundinstandhaltung bei Kleinstunternehmen, kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) - Ein Konzept für neue Organisationsformen der Instandhaltung*. zugl.: Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 2012: Universität-Verlag Ilmenau.
- Wenger, W., Geiger, M. J., & Kleine, A. (2011). *Business Excellence in Produktion und Logistik: Festschrift für Prof. Dr. Walter Habenicht*. Wiesbaden: Gabler-Verlag.
- Wenzel, R., Georg, F., Metze, G., & Nieß, P. (2001). *Industriebetriebslehre : das Management des Produktionsbetriebs*. München: Fachbuchverlag Leipzig im Hanser-Verlag.
- Wiendahl, H.-P. (1997). *Fertigungsregelung : Logistische Beherrschung von Fertigungsabläufen auf Basis des Trichtermodells*. München: Hanser-Verlag.
- Wiendahl, H.-P. (2004). *Variantenbeherrschung in der Montage : Konzept und Praxis der flexiblen Produktionsendstufe*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Wiendahl, H.-P. (2005). *Betriebsorganisation für Ingenieure*. München: Hanser-Verlag.
- Wiendahl, H.-P., & Nyhuis, P. (1998). *Engpassorientierte Logistikanalyse : Methoden zur kurzfristigen Leistungssteigerung in Produktionsprozessen*. München: TCW Transfer-Centrum-Verlag.
- Wildemann, H. (1990). *Das Just-In-Time-Konzept: Produktion und Zulieferung auf Abruf*. München: gfmt-Verlag.
- Wildemann, H. (2001). *Logistik Prozessmanagement: Organisation und Methoden*. München: TCW Transfer-Centrum-Verlag.
- Wilhelm, B. (1979). *Beitrag zur optimalen Steuerung von Montagelinien mit Modell-Mix in der Automobilindustrie*. zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1979.
- Winkelhake, U. (1989). *Permanente Maschinendatenerfassung automatischer Montageanlagen*. zugl.: Dissertation, Universität Hannover, 1989. Düsseldorf: VDI - Verlag.

- Witt, G., & Dürr, H. (2006). *Taschenbuch der Fertigungstechnik : mit zahlreichen Tabellen*. München: Fachbuchverlag Leipzig im Hanser-Verlag.
- Wossog, G. (2003). *Handbuch Rohrleitungsbau*. Essen: Vulkan-Verlag.
- Zäpfel, G. (1982). *Produktionswirtschaft: Operatives Produktions-Management*. Berlin: Walter de Gruyter & Co.
- Zäpfel, G. (2000). *Taktisches Produktionsmanagement*. München: Oldenbourg-Verlag.
- Zelewski, S., Susanne, H., & Hügens, T. (2008). *Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme: Konzepte und exemplarische Implementierungen mithilfe von SAP R/3*. München: Oldenbourg-Verlag.
- Ziser, S. (2007). *Einsatz von Optimized Production Technology (OPT), Constant Work in Process (CONWIP) und Retrograde Terminierung (RT) in der Industrie und deren Vergleich*. Studienarbeit, Archiv-Nr. V83982. München: GRIN-Verlag.
- Zocher, K.-P. (2002). Adaptive und selektive Montage in der flexiblen Fertigung. 47. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, 23. bis 26.09.2002, (S. 423-424). Technische Universität Ilmenau.
- Zocher, K.-P. (2002). *Grundlagen der qualitätssichernden Fertigungsgestaltung und –steuerung*. Vorlesungsskript Teil 4. Technische Universität Ilmenau.

